


System for determination of the imaging quality of an optical imaging system has an electronic object pattern generating device such as a projector or monitor that is used to generate an electronically controllable pattern

Patent number: DE10154125
Publication date: 2003-05-22
Inventor: WEGMANN ULRICH (DE)
Applicant: ZEISS CARL SEMICONDUCTOR MFG (DE)
Classification:
- **international:** G01B9/00
- **europaean:** G01M11/02E
Application number: DE20011054125 20011025
Priority number(s): DE20011054125 20011025

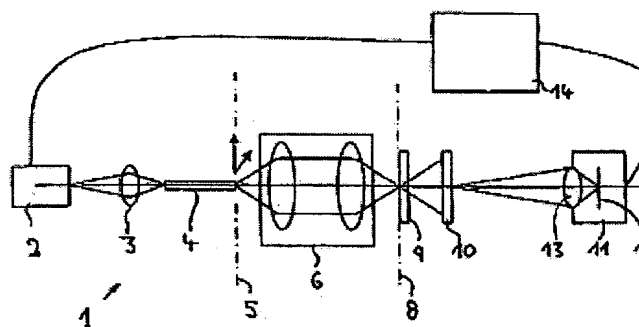
Also published as:

 US2003137655 (A1)

Report a data error he

Abstract of DE10154125

Method for measurement of the image quality of an optical imaging system in which an object pattern is created at the object plane and imaged using the imaging system to create a reference pattern. The resulting 2-D interference pattern is spatially resolved to determine imaging parameters. The object pattern is generated using an electronically controllable pattern generation device that can include a color monitor forming a self-illuminating electronically controllable incoherent light source. An Independent claim is made for a measurement system for determining the image quality of an optical imaging system.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

BEST AVAILABLE COPY

THIS PAGE BLANK (USPTO)



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 101 54 125 A 1**

⑤ Int. Cl.⁷:
G 01 B 9/00

⑳ Aktenzeichen: 101 54 125.2
㉔ Anmeldetag: 25. 10. 2001
㉕ Offenlegungstag: 22. 5. 2003

㉑ Anmelder:
Carl Zeiss Semiconductor Manufacturing
Technologies AG, 73447 Oberkochen, DE

㉒ Vertreter:
Patentanwälte Ruff, Wilhelm, Beier, Dauster &
Partner, 70174 Stuttgart

㉓ Erfinder:
Wegmann, Ulrich, 89551 Königsbrunn, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Rechercheantrag gem. Paragraph 43 Abs. 1 Satz PatG ist gestellt

⑤4 Messverfahren und Messsystem zur Vermessung der Abbildungsqualität eines optischen Abbildungssystems

⑤7 Zur Vermessung der Abbildungsqualität eines optischen Abbildungssystems, beispielsweise eines Brillenglases, eines Photoobjektives oder eines Projektionsobjektives für den sichtbaren Wellenlängenbereich, wird im Bereich der Objektfläche des Abbildungssystems ein Objektmuster erzeugt, welches durch das Abbildungssystem in die Bildebene des Abbildungssystems abgebildet wird, wo sich ein dem Objektmuster angepasstes Referenzmuster befindet. Das entstehende, zweidimensionale Überlagerungsmuster wird ortsauflösend erfasst, um daraus Abbildungsparameter zu bestimmen. Das Objektmuster wird mit Hilfe mindestens einer elektronisch ansteuerbaren Mustererzeugungseinrichtung erzeugt, die beispielsweise einen Farbmonitor aufweisen kann, der als selbstleuchtende, elektronisch strukturierbare, inkohärente Lichtquelle dient. Das Messsystem erlaubt eine schnelle und flexible Prüfung optischer Abbildungssysteme bei minimalem mechanisch-konstruktivem Aufwand.

DE 101 54 125 A 1

DE 101 54 125 A 1

[0001] Die Erfindung betrifft ein Messverfahren sowie ein Messsystem zur Vermessung der Abbildungsqualität eines optischen Abbildungssystems.

[0002] Auf vielen Gebieten in Technik und Forschung werden optische Abbildungssysteme eingesetzt, an die bezüglich ihrer Abbildungsqualität immer höhere Anforderungen gestellt werden. Ein Beispiel ist die photolithographische Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen fein strukturierten Bauteilen, bei der mit Hilfe von Hochleistungs-Projektionsobjektiven Strukturen im Submikrometerbereich erzeugt werden können. Ein anderes Beispiel sind Photoobjektive aller Art, an die in Regel geringere Anforderungen bezüglich der Abbildungsqualität gestellt werden.

[0003] Abbildungsoptiken haben häufig einen aufwendigen optischen Aufbau mit einer Vielzahl von Linsen, der es in der Regel unmöglich macht, die optischen Eigenschaften aus theoretischen Rechnungen abzuleiten. Daher müssen die optischen Eigenschaften von Abbildungssystemen zuverlässig gemessen werden. Die Genauigkeit der zur Prüfung dieser Abbildungssysteme verwendeten Prüfverfahren wird dabei normalerweise den Anforderungen an die Abbildungs-genauigkeit der Abbildungssysteme angepasst.

[0004] Häufig werden interferometrische Messverfahren eingesetzt. Eine nach Art eines Shearing-Interferometers arbeitende Vorrichtung zur Wellenfronterfassung, die eine schnelle, hochgenaue Vermessung höchstauflösender photolithographischer Projektionsobjektive ermöglicht, ist in der Deutschen Patentanmeldung mit Aktenzeichen DE 101 09 929.0 beschrieben. Bei dieser wird in der Objektenebene des zu prüfenden Abbildungssystems eine mit inkohärentem Licht beleuchtete Maske angeordnet. Diese umfasst einen starren, beispielsweise aus Quarzglas gefertigten, transparenten Träger, auf dem ein zweidimensionales Objektmuster, beispielsweise durch geeignete Beschichtung mit Chrom, aufgebracht ist. In der Bildebene des Abbildungssystems ist ein als Beugungsgitter ausgebildetes Referenzmuster angeordnet. Durch die Überlagerung der durch Beugung erzeugten Wellen entsteht ein Überlagerungsmuster in Form eines Interferogrammes, das mit Hilfe eines geeigneten (ortsauflösenden) Detektors erfasst wird.

[0005] Um aus den Interferogrammen eine zweidimensionale Phasenverteilung berechnen zu können, sind mehrere Interferogramme mit verschiedenen Phasenlagen nötig. Die Phasenlage kann durch Verschiebung des (bildseitigen) Beugungsgitters oder durch Verschiebung der (objektseitigen) Maske variiert werden. Die Verschiebewege bei diesem als Phasenschieben bezeichneten Vorgang betragen typischerweise Bruchteile der Gitterperiode. Aus praktischen Gründen wird bei Interferometern zur Vermessung hochauflösender, mikrolithographischer Reduktionsobjektive in der Regel das bildseitige Gitter mit dem Referenzmuster verschoben, da objektseitig die Verschiebewege und die zu bewegendenden Massen größer sind.

[0006] Die Genauigkeit der Phasenverschiebung hat wesentlichen Einfluss auf die Messgenauigkeit und muss bei Anwendungen, in denen Auflösungen im Nanometerbereich beurteilt werden sollen, auf wenige Nanometer genau kontrolliert werden. Da bevorzugt eine zweidimensionale Beugungsstruktur mit mehreren Periodizitätsrichtungen verwendet wird, ist eine Bewegung des Gittersubstrats in quer zueinander verlaufenden Periodenrichtungen senkrecht zur optischen Achse des Abbildungssystems erforderlich. Um den Interferenzkontrast in einer Bildrichtung ermitteln zu können, wird der Interferenzkontrast in einer anderen Bildrichtung durch eine relativ schnelle Gitterbewegung mit oder ohne Umkehrung der Bewegungsrichtung ausgelöscht.

Bei dieser oszillierenden Auslenkung des Gitters in der Gitterebene ist eine Auslenkung aus dieser Ebene unbedingt zu vermeiden. Diese Anforderungen an die Bewegungsmechanik für das Gitter führen zu einem mechanisch relativ aufwendigem Aufbau. Weiterhin können die auftretenden Beschleunigungskräfte auf den Gesamtaufbau rückwirken und Schwingungen induzieren, die für die Messgenauigkeit schädlich sind.

[0007] Andere interferometrische Vorrichtungen zur Wellenfronterfassung sind beispielsweise in dem Artikel "Phase measuring Ronchi-test von OMURA et al. Applied Optics, Vol. 27, no 3, 1988, Seiten 523 bis 528, der Patentanmeldung DD 01 54 239 oder der Patentanmeldung DE 195 38 747 beschrieben.

[0008] Andere Prüfverfahren, insbesondere zur Vermessung der Verzeichnung optischer Systeme, beruhen auf der Ausnutzung des Moiré-Effekts. Bei diesen wird in der Objektenebene des Prüflings ein Objektgitter angeordnet, das beispielsweise eine Vielzahl paralleler, nicht-transparenter Linien umfasst, die ein Objektmuster bilden. In der Bildebene wird ein dem Objektmuster ähnliches Bildmuster angeordnet, wobei das Objektmuster und das Bildmuster derart aufeinander abgestimmt sind, dass bei Abbildung des Objektmusters auf das Bildmuster mit Hilfe des Abbildungssystems ein Überlagerungsmuster in Form eines Moiré-Musters mit Moiré-Streifen entsteht. Aus der Intensitätsverteilung des Streifenmusters, welche mit einem ortsauflösenden Detektor erfasst wird, können Abbildungsparameter insbesondere für die Verzeichnung des Abbildungssystems ermittelt werden. Moiré-Verfahren sind beispielsweise aus der Patentschrift US 5,767,959, der weitgehend inhaltsgleichen US 5,973,773 oder der EP 0 418 054 bekannt.

[0009] Zur Beleuchtung der semi-transparenten Masken sind jeweils separate Lichtquellen bzw. Beleuchtungseinrichtungen vorgesehen.

[0010] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Messverfahren und ein entsprechendes Messsystem anzugeben, mit dem die Abbildungsqualität von optischen Abbildungssystemen bei geringen Anforderungen an den mechanischen Aufbau des Systems schnell und flexibel vermessen werden kann.

[0011] Zur Lösung dieser Aufgabe schlägt die Erfindung ein Messverfahren zur Vermessung der Abbildungsqualität eines optischen Abbildungssystems vor, welche folgende Schritte aufweist:

Erzeugung mindestens eines abzubildenden Objektmusters im Bereich der Objektfläche des Abbildungssystems mit Hilfe mindestens einer elektronisch ansteuerbaren Mustererzeugungseinrichtung;

Bereitstellung eines dem abzubildenden Objektmuster angepassten Referenzmusters im Bereich der Bildfläche des Abbildungssystems;

Überlagerung einer Abbildung des Objektmusters mit dem Referenzmuster zur Erzeugung eines Überlagerungsmusters;

Ortsauflösende Detektion des Überlagerungsmusters;

Ermittlung mindestens eines die Abbildungsqualität des Abbildungssystems beschreibenden Abbildungsparameters aus dem Überlagerungsmuster.

[0012] Ein entsprechendes Messsystem zur Vermessung der Abbildungsqualität eines optischen Abbildungssystems umfasst entsprechend:

Eine Einrichtung zur Erzeugung mindestens eines Objektmusters im Bereich der Objektfläche des Abbildungssystems, wobei diese Einrichtung mindestens eine elektronisch ansteuerbare Mustererzeugungseinrichtung und eine zur Ansteuerung der Mustererzeugungseinrichtung ausgebildete, elektronische Steuereinheit umfasst;

Ein in der Bildfläche des optischen Abbildungssystems angeordnetes, dem Objektmuster angepasstes Referenzmuster; Einen Detektor zur ortsauflösenden Detektion eines Überlagerungsmusters, und

eine Einrichtung zur Ermittlung mindestens eines die Abbildungsqualität des Abbildungssystems beschreibenden Abbildungsparameters aus dem Überlagerungsmuster.

[0013] Da bei Vermessungen von Abbildungssystemen der Lichtweg prinzipiell umkehrbar ist, kann als Objektfläche für die Vermessung auch jede zu dieser Objektfläche konjugierte Fläche dienen, beispielsweise diejenige Fläche, die bei der bestimmungsgemäßen Verwendung des Abbildungssystems als Bildfläche dient. In diesem Sinne kann gemäß der Erfindung auch das Referenzmuster mit Hilfe einer elektronisch ansteuerbaren Mustererzeugungseinrichtung erzeugt werden. Auch Verfahren, bei denen sowohl das Objektmuster, als auch das Referenzmuster elektronisch erzeugt werden, sollen umfasst sein. Die Objektfläche und die Bildfläche können eben sein, insbesondere bei fotografischen Anwendungen oder in der Photolithographie. Bei anderen Anwendungen, z. B. bei Projektoren für Kinos und Planetarien, kommen auch einachsige oder mehrachsige gekrümmte Bild- und/oder Objektflächen vor. Je nach Anwendungsfall kann das Objektmuster und/oder das Referenzmuster genau in der Objektfläche bzw. Referenzfläche angeordnet werden oder in deren Nähe, aber außerhalb der jeweiligen Fläche.

[0014] Die Erfindung schlägt somit vor, mindestens eines der zu überlagernden Muster, insbesondere das Objektmuster, nicht durch eine starre Maske mit festgelegter Geometrie und dementsprechend festgelegter abbildungswirksamer Struktur bereit zu stellen, sondern mindestens eines der Muster auf elektronischem Wege zu erzeugen. Durch den erfindungsgemäßen Ersatz mindestens einer starren, körperlichen Maske, beispielsweise einer Beleuchtungsmaske, durch ein elektronisch erzeugtes Äquivalent, kann teilweise oder ganz auf körperlich starre Masken herkömmlicher Art verzichtet werden.

[0015] Die elektronische Erzeugung mindestens eines Musters eröffnet im Zusammenhang mit der Vermessung optischer Komponenten neue Dimensionen. So kann beispielsweise eine Veränderung des Objektmusters durch elektronische Ansteuerung der Mustererzeugungseinrichtung zur elektronischen Erzeugung eines gegenüber einem Grundzustand veränderten Objektmusters herbeigeführt werden, ohne dass hierzu eine mechanische Bewegung von Bauteilen erforderlich ist. Beispielsweise kann die Veränderung des Objektmusters eine Verschiebung und/oder eine Verdrehung eines Objektmusters in einer Objektmusterfläche umfassen, wobei das Objektmuster als Ganzes vorzugsweise hinsichtlich seiner Form und seiner Dimensionen, also beispielsweise hinsichtlich der Gitterkonstanten eines Lineargitters oder eines Kreuzgitters, im wesentlichen unverändert bleiben kann. Hierdurch kann eine mechanisch betätigte "Bewegung" einer Maske durch eine elektronische Bewegung eines elektronisch erzeugten Musters ersetzt werden. Dieser Ersatz von Mechanik durch Elektronik kann beispielsweise beim eingangs erwähnten Phasenschieben nutzbringend eingesetzt werden, indem ein in sich weitgehend unveränderliches Muster elektronisch in einer Bildrichtung schrittweise verschoben wird. Gleichmaßen ist es möglich, ein in sich weitgehend unverändertes Muster um eine parallel zur optischen Achse des Messsystems ausgerichtete Achse zu verdrehen. Dies kann beispielsweise bei dem eingangs erwähnten Moiré-Verfahren von Vorteil sein, um Verzeichnungskomponenten in unterschiedlichen Bildrichtungen zu bestimmen, ohne hierzu das zu vermessende Objektiv um seine Achse drehen zu müssen.

[0016] Es sind auch Veränderungen des Objektmusters (und/oder des Referenzmusters) möglich, die mit herkömmlichen, starren Masken prinzipbedingt unmöglich waren. So kann beispielsweise die Veränderung des Objektmusters eine Dehnung oder Stauchung eines Grundmusters umfassen, also eine Dimensionsänderung in mindestens eine Bildrichtung. Beispielsweise kann eine eindimensionale Dehnung eines aus parallelen Linien aufgebauten linearen Gitters senkrecht zu den Gitterlinien zur Veränderung der Gitterkonstante des Gitters benutzt werden. Eine entsprechende Wirkung auf zweidimensionale, orthogonale Gitterstrukturen, beispielsweise Kreuzgitter oder Schachbrettgitter, lässt sich durch Dehnung/Stauchung in zwei zu einander senkrechten Bildrichtungen erreichen. Auch radialsymmetrische Dehnungen/Stauchungen von radialsymmetrischen Gitterstrukturen, beispielsweise konzentrischen Kreisen, ist möglich.

[0017] Die Erfindung ermöglicht auch ein neuartiges Messverfahren, welches hier als Radial-Shearing-Verfahren bezeichnet wird. Bei diesem Verfahren werden Objektmuster verwendet, die innerhalb der Musterfläche ein Verschiebungszentrum haben. Die Veränderung des Objektmusters beim Phasenschieben umfasst eine Verschiebung von Musterstrukturen in radialen Richtungen relativ zu diesem Verschiebungszentrum. Hierbei ist es insbesondere möglich, dass die Periodizität der Musterstrukturen, d. h. deren Gitterkonstante in Radialrichtung, beim Verschieben konstant bleibt. Beispielsweise kann bei einem Radial-Shearing-Interferometer das Beugungsgitter rotationssymmetrisch sein und insbesondere aus konzentrisch angeordneten kreisförmigen Linien bestehen. Die Beugungsordnungen bzw. Scherrichtungen liegen senkrecht zu den Gitterlinien, also in radialer Richtung zum Zentrum der Ringstruktur. Bei gleicher bzw. konstant gehaltener Gitterperiode sind die Beugungswinkel in radialer Richtung konstant. Somit liefern die Scherogramme die Wellenfrontdifferenzen in radialer Richtung. Die radiale Phasenschiebung kann sowohl in der Shearing-Interferometrie (mit Maske und Beugungsgitter) also auch bei Moiré-Verfahren (mit Objekt- oder Bildgitter) eingesetzt werden. Eine radiale Phasenschiebung von radialsymmetrischen, insbesondere rotationssymmetrischen Mustern senkrecht zu den Gitterlinien ist bei starren körperlichen Gittern herkömmlicher Art nicht möglich.

[0018] Neben rotationssymmetrischen Objekt- und/oder Referenzmustern können auch andere radialsymmetrische Musterstrukturen erzeugt und verwendet werden, beispielsweise Muster mit mehrzähliger Rotationssymmetrie. Beispielsweise können Gitter mit drei oder vierzähliger Radialsymmetrie zur Vermessung von geometrischen Formen wie Pyramiden, Oktaedern oder dergleichen verwendet werden.

[0019] Allgemein ermöglicht es die Erfindung, fast beliebige, an eine spezielle Messaufgabe angepasste Mustergeometrien bzw. Gittergeometrien zu verwenden und mit diesen Gittergeometrien Phasenschiebverfahren durchzuführen. Beispielsweise können Objektmuster genutzt werden, die innerhalb der Musterfläche einen Verlauf mindestens einer Periodizitätsrichtung und/oder einen Verlauf der Periodizität der Musterstruktur aufweisen. Durch einen derartigen Verlauf sind mehrere zweidimensionale Bereiche bzw. Zonen mit unterschiedlicher Periodizität und/oder Periodizitätsrichtung der Musterstruktur möglich, wobei bei einem kontinuierlichen Verlauf die Periodizitäten und Periodizitätsrichtungen stufenlos in einander übergehen können. Es sind auch klar abgegrenzte Bereiche bzw. Zonen möglich, um beispielsweise Mehrstärkengläser vermessen zu können. Zum Phasenschieben kann die Verschiebung der Gitterstrukturen für mehrere Zonen separat in unterschiedlichen Verschiebungsrichtungen und/oder über unterschiedliche Verschiebungswege durchgeführt werden, da es die Erfin-

dung ermöglicht, innerhalb einer Musterfläche mit mehreren Zonen diese komplett von einander entkoppelt zu nutzen.

[0020] Bei einer Verfahrensvariante ist vorgesehen, dass die Veränderung des Objektmusters eine Überlagerung des Objektmusters mit einem vorgegebenen Intensitätsprofil umfasst. Dies kann beispielweise so aussehen, dass ein periodisches Objektmuster mit im wesentlichen gleichmäßiger mittlerer Bildhelligkeit über das gesamte Bildfeld so verändert wird, dass die Bildhelligkeit vom Zentrum des Bildfeldes nach außen monoton zunimmt oder abnimmt. Gegebenfalls kann auch ein Intensitätsgradient in einer Bildrichtung erzeugt werden. Die Überlagerung mit einem Intensitätsprofil kann z. B. als Ersatz für herkömmliche Graufilter dienen, um beispielsweise die auf den Detektor einfallende Beleuchtungsintensitätsverteilung an die räumliche Empfindlichkeitscharakteristik eines flächenhaften Detektors anzupassen.

[0021] Es ist auch möglich, dass die Veränderung des Objektmusters eine Überlagerung mit einem vorgegebenen Verzerrungsprofil umfasst, um aus einer geometrisch idealen Struktur eine geringfügig verzerrte Struktur zu erzeugen. Dies kann z. B. dazu dienen, im Objektmuster einen Vorhalt an Verzerrung zu schaffen, der entsprechende Verzerrungsfehler von nachgeschalteten Abbildungsoptiken kompensiert, an deren Ausgangseite dann ein geometrisch ideales Muster entsteht.

[0022] Bei allen Objektmustern und Verfahrensvarianten ist es weiterhin auf einfache Weise möglich, ein Objektmuster derart zu erzeugen, dass es in mindestens einer in der Objektfläche liegenden Richtung mindestens abschnittsweise eine kontinuierliche Variation seiner Transmissionseigenschaften oder Reflexionseigenschaften aufweist. Es sind somit Objektmuster oder Masken mit Graustufen möglich, um beispielsweise senkrecht zum Verlauf von Gitterlinien einen sinusförmigen Transmissions- oder Reflexionsverlauf zu erzielen. Derartige Verläufe bieten mehr Freiheit in der Auslegung der Kohärenzfunktion, um beispielsweise den Interferenzkontrast niedriger Ordnungen zu optimieren und als Störtherme wirkende höhere Ordnungen zu unterdrücken. Mit herkömmlichen Verfahren ist die Herstellung von Masken mit Graustufen aufwendig, da dazu beispielsweise dithering-Techniken angewendet werden müssen.

[0023] Eine erhebliche Reduktion der Anzahl erforderlicher Bauteile bzw. Komponenten lässt sich bei einer bevorzugten Ausführungsform dadurch erreichen, dass die Musterzeugungseinrichtung eine selbstleuchtende, elektronisch zweidimensional strukturierbare Beleuchtungseinheit umfasst. Damit werden Messeinrichtungen möglich, bei denen die Lichtquelle selbst kontrolliert zweidimensional strukturierbar ist. Für eine Anwendung im sichtbaren Wellenlängenbereich kommen beispielweise leuchtstarke Farbdarstellungen, Digitalprojektoren, Plasmabildschirme oder dergleichen als Beleuchtungseinheit in Frage. Sie können als rechnergesteuerte strukturierbare Selbstleuchter dienen. Entsprechendes gilt selbstverständlich auch für monochromatische Ausführungen. Abhängig von der Prüfaufgabe und dem Auflösungsvermögen des eingesetzten Displays können ein oder mehrere optische Einrichtungen nachgeschaltet sein, die das selbstleuchtende Bildschirmmuster der Beleuchtungseinheit in die Objektebene bzw. Objektfläche des zu vermessenden Abbildungssystems projizieren, um beispielsweise den Abbildungsmaßstab und die Pupillenausleuchtung an die Erfordernisse der Prüfaufgabe anzupassen. Bei diesen Ausführungsformen können die Funktionen der herkömmlichen separaten Lichtquelle und der Objektmaske in einer einzigen Einheit mit selbstleuchtender Beleuchtungseinheit integriert werden. Gesonderte Lichtquellen können damit entfallen.

[0024] Alternativ oder zusätzlich es ist auch möglich, dass bei der Erzeugung des Objektmusters mindestens eine teilweise transparente oder teilweise reflektierende Maske mit einer elektronisch erzeugbaren und/oder veränderbaren zweidimensionalen, lichtundurchlässigen oder reflektierenden Maskenstruktur verwendet wird, welche die Aufgabe herkömmlicher lichtundurchlässiger Strukturen auf Maskenträgern übernimmt. Möglich ist beispielweise der Einsatz von Bauteilen wie Flüssigkristall-Arrays (LCD-Einheiten) oder ähnlicher schaltbarer Elemente, die eine ortsauflösende Variation ihrer Reflexions- oder Transmissionseigenschaften zulassen. Durch diese könnten, je nach Anwendung, Reflexions- oder Transmissionsmasken herkömmlicher Bauart ersetzt werden. Die Beleuchtung dieser elektronisch kontrollierbaren Maskeneinheiten kann beispielsweise mit Hilfe refraktiver und/oder diffraktiver Elemente, Mikrolinsen, Lichtleiter, oder ähnlichen optischen Komponenten erfolgen.

[0025] Eine Ausführungsvariante, die besonders bei der Vermessung von Photoobjektiven und anderen optischen Abbildungssystemen für den sichtbaren Wellenlängenbereich nutzbringend einsetzbar ist, sieht eine Durchstrahlung des optischen Abbildungssystems mit Licht unterschiedlicher Wellenlängen und eine dementsprechende ortsauflösende Detektion von mehreren Überlagerungsmustern vor, die jeweils unterschiedlichen Wellenlängen zugeordnet sind. Dabei ist es möglich, Licht unterschiedlicher Wellenlängen bzw. unterschiedlicher, schmalbandiger Wellenlängenbereiche nacheinander einzusetzen. Vorzugsweise werden jedoch simultan bzw. gleichzeitig mehrere Wellenlängen bzw. Wellenlängenbereiche eingesetzt, die z. B. den Grundfarben Rot, Grün und Blau entsprechen. Eine simultane, multichromatische Messung kann auf einfache Weise dadurch erreicht werden, dass auf der Beleuchtungsseite eine mehrfarbige Lichtquelle vorgesehen ist, die in der Lage ist, Licht unterschiedlicher Wellenlängen bzw. Wellenlängenbereiche, vorzugsweise gleichzeitig, auszusenden. Die Mehrfarbigkeit kann auch durch geeignete Filterung geschaffen werden. Auf der Detektorseite wird vorzugsweise ein für mehrere Wellenlängen empfindlicher, ortsauflösender Detektor eingesetzt, der beispielweise eine Farbkamera mit entsprechenden CCD-Chips umfasst. Durch die vorzugsweise simultane Nutzung unterschiedlicher Wellenlängen ist es auf einfache Weise möglich, von der Wellenlänge des verwendeten Lichtes abhängige Abbildungsfehler (Farbfehler) einer Abbildungsoptik zu qualifizieren. Obwohl zwei verschiedene Wellenlängen(bereiche) ausreichen können, sind mehr als zwei, insbesondere drei unterschiedliche Farben bzw. Wellenlängen bevorzugt, um eine zuverlässige spektrale Information zu erhalten. Bevorzugte Anwendungsgebiete der hier beschriebenen multichromatischen Vermessung liegen im Bereich der Vermessung von Optiken im visuellen Wellenlängenbereich, z. B. bei Fotoobjektiven, Optiken zur Luftbildvermessung, Optiken im medizinischen Bereich oder dergleichen. Auch Wellenlängen(bereiche) außerhalb des sichtbaren Spektrums können genutzt werden, z. B. Wellenlängen im Infrarot (IR)-Bereich oder im Ultraviolett (UV)-Bereich.

[0026] Die hier erläuterte multichromatische Vermessung, insbesondere mittels Interferometrie, kann unabhängig von den Merkmalen der Erfindung bei allen Messverfahren zur Vermessung der Abbildungsqualität optischer Abbildungssysteme vorteilhaft eingesetzt werden, insbesondere auch bei Messverfahren, bei denen starre, nicht elektronisch veränderbare Masken herkömmlicher Art verwendet werden.

[0027] Die Erfindung kann sowohl bei einkanaligen, als auch bei mehrkanaligen Messungen genutzt werden. Um eine Messung bei verschiedenen Feldpunkten über das ge-

samte Bildfeld zu ermöglichen, kann bei einkanalen Messungen vorgesehen sein, das Objektmuster und/oder das Bildmuster mit Hilfe von Verschiebungseinrichtungen in ihren jeweiligen Anordnungsflächen zu verschieben, um z. B. auf diese Weise ein gesamtes Bildfeld zu scannen. Eine mehrkanalige Messung, bei der mehrere zueinander beabstandete Feldpunkte gleichzeitig vermessen werden können, lässt sich bei der Erfindung leicht dadurch erreichen, dass das Objektmuster in eine Vielzahl von nebeneinander angeordneten Mustersegmenten unterteilt wird, die normalerweise jeweils identische Struktur haben. Dies ist beispielsweise durch Unterteilung einer Bildschirmfläche in flächendeckende, zueinander identische Teil-Flächen oder durch die Bereitstellung mehrerer, gegebenenfalls simultan ansteuerbarer Bildschirme, Projektoren oder dergleichen zu erreichen.

[0028] Abhängig von der Art des zu vermessenden Abbildungssystems, dem zur Verfügung stehenden Raum und anderen Randbedingungen kann es günstig sein, wenn bei der Erzeugung des Objektmusters mindestens eine Sekundärstrahlerfläche bestrahlt wird, die sich im Strahlengang zwischen einer Primärstrahlungsquelle und dem zu vermessenden Abbildungssystem befindet. Es kann sich dabei um einen transmittierenden Sekundärstrahler, beispielsweise nach Art einer Mattscheibe oder Streuscheibe handeln, und/oder um eine reflektierende Sekundärstrahlerfläche, beispielsweise nach Art einer Leinwand. Die Sekundärstrahlerfläche ist zweckmäßig im Bereich der Objektebene angebracht. Der Verlauf der Fläche (eben, einachsrig oder mehrachsrig gekrümmt) kann der Art der zu vermessenden Optik angepasst sein. So sind beispielsweise Kinoleinwände häufig zylindrisch gekrümmt, so dass entsprechende Projektionsoptiken zylindrisch gekrümmt Bildflächen haben. Dies kann bei der Vermessung durch eine entsprechend gekrümmt sekundäre Lichtquelle berücksichtigt werden.

[0029] Eine Verfahrensvariante sieht vor, zur Erzeugung des Objektmusters eine Sekundärstrahlerfläche mit mindestens einem relativ zu der Sekundärstrahlerfläche gesteuert beweglichen Lichtstrahl derart zu bestrahlen, dass innerhalb eines Schreib-Zeitintervalls das Objektmuster geschrieben wird. Bei dieser schreibenden Projektion kann als Lichtquelle beispielsweise ein Laserprojektor mit eingebautem Scannerspiegel verwendet werden. Die für das "Schreiben" eines kompletten Objektmusters erforderliche Zeit wird zweckmäßig mit der Belichtungszeit einer detektorseitig vorgesehenen Kamera synchronisiert. Je nach Aufbau können reflektive oder transmittierende Sekundärstrahlerflächen genutzt werden.

[0030] Es ist auch möglich, detektorseitig mindestens eine Sekundärstrahlerfläche vorzusehen, welche eben oder gekrümmt sein kann, beispielsweise zylindrisch oder kalottenförmig gekrümmt. Bei Bedarf kann eine Sekundärstrahlerfläche auch frequenzwandelnd ausgebildet sein, um beispielsweise eine bessere Ausnutzung der Detektorempfindlichkeit zu ermöglichen. Die Sekundärstrahlerfläche kann mit Abstand vom Referenzmuster oder in dessen unmittelbaren Bereich angeordnet sein.

[0031] Die vorstehenden und weiteren Merkmale gehen außer aus den Ansprüchen auch aus der Beschreibung und den Zeichnungen hervor, wobei die einzelnen Merkmale jeweils für sich alleine oder zu mehreren in Form von Unterkombinationen bei einer Ausführungsform der Erfindung und auf anderen Gebieten verwirklicht sein und vorteilhafte sowie für sich schutzfähige Ausführungen darstellen können. Es zeigen:

[0032] Fig. 1 eine erste Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Messsystems, bei dem die Mustererzeugungseinrichtung einen Projektor enthält und ein Bildleiter

zur Einkopplung des Objektmusters in das zu prüfende Abbildungssystem verwendet wird;

[0033] Fig. 2 eine zweite Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Messsystems, bei der in der Objektebene des Prüflings eine Sekundärstrahlerfläche in Form einer Leinwand angeordnet ist, die von einem Projektor angestrahlt wird;

[0034] Fig. 3 eine dritte Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Messsystems, bei dem zwischen einem Projektor und dem zu prüfenden Abbildungssystem ein Umlenkspiegel angeordnet ist;

[0035] Fig. 4 eine vierte Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Messsystems mit einer direkten Abbildung mehrerer Objektmuster an verschiedenen Feldpositionen auf einem einzigen Monitor (Mehrkanalmessung);

[0036] Fig. 5 eine fünfte Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Messsystems für eine mehrkanalige Messung, bei der für verschiedene Feldpunkte gesonderte Monitore vorgesehen sind, die in einer gekrümmten Objektfläche eines Abbildungssystems angeordnet sind;

[0037] Fig. 6 eine sechste Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Messsystems mit einkanaliger, multichromatischer Beleuchtung und einem für mehrere Wellenlängen empfindlichen Detektor; und

[0038] Fig. 7 eine siebte Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Messsystems mit einer Mustererzeugungseinrichtung, die eine elektronische ansteuerbare, teiltransparente Maskeneinheit aufweist,

[0039] Fig. 8 eine Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Messsystems, das für eine schreibende Projektion des Objektmusters ausgelegt ist,

[0040] Fig. 9 eine Ausführungsform eines Messsystems zur Durchführung eines Moiré-Verfahrens, wobei ein Referenzgitter direkt auf einer transparenten Abdeckung eines CCD-Chips angeordnet ist,

[0041] Fig. 10 eine Ausführungsform eines Messsystems für ein Moiré-Verfahren, wobei in unmittelbarer Nähe des Referenzgitters eine Sekundärstrahlerfläche angeordnet ist,

[0042] Fig. 11 eine Ausführungsform eines Messsystems, das als Radial-Shearing-Interferometer konfiguriert ist,

[0043] Fig. 12 eine schematische Darstellung eines rotationssymmetrischen Objektmusters mit konzentrischen Kreisen,

[0044] Fig. 13 eine schematische Darstellung der zum Muster von Fig. 12 gehörigen, radial ausgerichteten Beugungsordnungen, die den Scherrichtungen entsprechen,

[0045] Fig. 14 ein Beispiel für ein radialsymmetrisches Objektmuster mit vierzähliger Symmetrie,

[0046] Fig. 15 ein Beispiel für ein Objektmuster mit zwei separat nutzbaren Zonen zur Vermessung eines Zweistärken-Brillenglases,

[0047] Fig. 16 ein Objektmuster mit einem kontinuierlichen Verlauf von Periodizitätsrichtung und Periodizität zur Vermessung von Gleitsichtgläsern, und

[0048] Fig. 17 ein rotationssymmetrisches Objektmuster mit einem in Radialrichtung sinusförmigen Verlauf der Transparenzfunktion.

[0049] An Hand der schematischen Längsschnittdarstellung in Fig. 1 wird eine erste Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Messsystems 1 erläutert, welches beispielsweise zur Vermessung von Photoobjektiven verwendet werden kann und nach Art eines Shearing-Interferometers arbeitet. Das Messsystem umfasst eine Mustererzeugungseinrichtung mit einem Farbmonitor 2, der bei anderen Ausführungsformen auch durch eine Projektionsoptik (z. B. einem Beamer) ersetzt werden kann. Der Farbmonitor 2 kann als multichromatische, zweidimensional strukturierte oder strukturierbare, inkohärente Lichtquelle des Messsystems

angesehen werden. Dem Farbmonitor ist eine Abbildungsoptik 3 zur Verkleinerung des Monitorbildes nachgeschaltet, wobei die Abbildungsoptik 3 so angeordnet ist, dass das Bild des Monitorbildes auf eine Eintrittsfläche eines flexiblen Bildleiters 4 fällt. Die Austrittsseite des Bildleiters 4 ist in der Objektebene 5 des nachgeschalteten optischen Abbildungssystems 6 angeordnet. Der Prüfling 6 ist in einer nicht gezeigten Prüflingsaufnahme vibrationsfrei gehalten. Das dem Prüfling 6 zugewandte Ende des Bildleiters kann mit Hilfe einer (nicht gezeigten) Verschiebungseinrichtung innerhalb der Objektebene (x-y Ebene) verschoben und auch zur genauen Anordnung in dieser Ebene in der senkrecht zur Objektebene verlaufenden Richtung bewegt werden.

[0050] Das zur vermessende optische System 6, dessen optische Achse 7 parallel zur optischen Achse des Messsystems und parallel zu dieser z-Richtung auszurichten ist, umfasst mehrere Linsen, von denen nur zwei symbolisch gezeigt sind, und bildet das am Austrittsende des Bildleiters 4 vorhandene Bild in die Bildebene 8 des Prüflings ab. In der Bildebene 8 ist ein Beugungsgitter 9, beispielsweise ein Schachbrettgitter, angeordnet, welches als Referenzmuster des Messsystems dient. Mit Abstand hinter dem Beugungsgitter 9 ist eine Mattscheibe oder Streuscheibe 10 senkrecht zur optischen Achse 7 angeordnet, welche als detektorseitige Sekundärstrahlerfläche dient, um hinter dem Beugungsgitter 9 entstehende Interferenzmuster sichtbar zu machen. Die Mattscheibe 10 ist in der Objektebene einer Farbkamera 11 angeordnet, mit der das auf der Mattscheibe 10 aufgefangene Überlagerungsmuster zweidimensional ortsauflösend detektierbar ist. Die Erfassung von Interferogrammen durch die Farbkamera kann gleichzeitig für mehrere Wellenlängen farbselektiv erfolgen. Der Detektor 11 umfasst eine strahlungssensitive Sensorfläche 12, z. B. einen CCD-Chip, sowie ein zwischen dem Beugungsgitter 9 und der Sensorfläche angeordnetes Abbildungssystem 13, welches das auf der Mattscheibe 10 sichtbare Interferogramm bzw. Sherogramm auf die Sensorfläche 12 abbildet. Der Detektor 12 ist an eine Rechneinheit 14 angeschlossen, in der geeignete Bildverarbeitungssoftware installiert ist, die die Rechneinheit so konfiguriert, dass sie als Einrichtung zur Ermittlung mindestens eines Abbildungsparameters des Prüflings 6 aus dem erfassten Überlagerungsmuster (Interferogramm) dienen kann. Die Rechneinheit 14 arbeitet auch als Steuerrechner zur Steuerung des bildgebenden Farbmonitors 2, um beispielsweise verschiedenartige zweidimensionale Objektmuster auf der Monitorfläche zu erzeugen.

[0051] Die Vermessung der Abbildungsqualität des Prüflings 6 und die damit verbundene Ermittlung mindestens eines diese Abbildungsqualität beschreibenden Abbildungsparameters (z. B. Verzeichnung, Farbfehler etc.) mit Hilfe der Messeinrichtung 1 kann wie folgt durchgeführt werden. Der zur Steuerung des Farbmonitors vorgesehene Teil der Rechneinheit 14 erzeugt auf dem lichtstarken Monitor 2 ein geeignetes Objektmuster, welches einer Maskenstruktur herkömmlicher, starrer Masken entsprechen kann. Es kann sich dabei beispielsweise um die Maskenstruktur einer Lochmaske mit einer zweidimensionalen, symmetrischen Verteilung von Löchern handeln. Die Form, Farbe und Lage der Maskenstruktur werden entsprechend dem Abbildungsverhältnis der nachgeschalteten Verkleinerungsoptik 3 und dem Abbildungsverhältnis des Prüflings 6 passend zu der Form und der Periode des Beugungsgitters 9 elektronisch generiert. Das Beugungsgitter kann beispielsweise ein Schachbrettmuster oder ein Linienmuster sein.

[0052] Die auf der Bildschirmfläche des Farbmonitors auf elektronischem Wege erzeugte Struktur kann, beispielsweise zum Zwecke der Phasenschiebung, softwaregesteuert in ihrer Lage verschoben werden. Die Verkleinerungsoptik 3

bildet das Bildschirmbild auf die Einkopplfläche des flexiblen Bildleiters 4 ab. Am Austrittsende des Bildleiters, welches sich in Objektebene 5 befindet, liegt dann das Objektmuster in Form der verkleinerten Maskenstruktur vor. Dieses Objektmuster kann als inkohärent leuchtendes Objekt mit elektronisch vorgebbare Struktur bzw. als Wellenfrontquelle des Interferometers betrachtet werden. Über die x-y-z-Verschiebeeinheit kann das Bildleiterende in die Objektebene geführt und gegebenenfalls in der Objektebene bewegt werden. Der Prüfling 6 bildet das Objektmuster in seine Bildebene 8 ab, in der sich das als Referenzmuster dienende Beugungsgitter 9 befindet. Bei der Überlagerung einer Abbildung des Objektmusters mit dem Referenzmuster zur Erzeugung eines Überlagerungsmusters erzeugt das in der Bildebene aufgestellte Beugungsgitter verschiedene Beugungsordnungen, deren kohärente Überlagerungen ein Interferogramm erzeugen, das mit der nachgeschalteten Mattscheibe 10 sichtbar gemacht wird. Der Interferenzkontrast ist hierbei gegeben durch den räumlichen Kohärenzgrad in der Gitterebene. Dieser wird durch die geeignete Auslegung der (elektronisch erzeugten) Maske und des Beugungsgitters unter Einbeziehung der Abbildungsmaßstäbe bestimmt. Die entstehenden Interferogramme werden durch den Detektor 11 simultan und farbselektiv aufgenommen.

[0053] Beim Messsystem 1 wird von einer (nicht gezeigten) Verschiebungseinrichtung das Austrittsende des Bildleiters 4 zur Abtastung des Bildfeldes des optischen Abbildungssystems 6 in x- und/oder y-Richtung verschoben. Simultan damit wird auch der Detektor 11 verschoben. Das Beugungsgitter 9 kann von einer (ebenfalls nicht gezeigten) Verschiebungsrichtung in der Bildebene des Abbildungssystems 6 in x- oder y-Richtung oszillierend verlagert werden, um den Kontrast eines der orthogonalen Interferenzsysteme des Beugungsgitters 9 unterdrücken zu können.

[0054] Die Rechneinheit 14 ist über Daten- und Steuerleitungen mit dem Monitor 2 und dem Detektor 11 verbunden und steuert die elektronische Erzeugung des Maskenbildes auf dem Farbmonitor, die Bildaufnahme und das Auslesen der Kamera 11 sowie gegebenenfalls eine mögliche Oszillationsbewegung des Beugungsgitters. Weiterhin erfolgt die Berechnung und Auswertung der vom Detektor erfassten Wellenfronten in der Rechneinheit 14. Zur Auswertung des Interferogramms wird bevorzugt die Phasenschiebemethode eingesetzt, die dem Fachmann bekannt ist und daher nicht näher erläutert wird. Hierzu muss die relative Phasenlage von Beugungsgitter 9 und Objektmuster kontrolliert verändert werden. Es sind mehrere Phasenschritte nötig. Von jedem Phasenschritt wird eine Aufnahme des zugehörigen Interferogramms im Rechner 14 zwischengespeichert. Diese werden dann gemeinsam ausgewertet.

[0055] Eine Besonderheit des hier vorgeschlagenen Aufbaus besteht darin, dass die Phasenschiebung ohne mechanische Bewegung irgendeines Teils des gesamten Messsystems alleine durch Veränderung der Phasenlage des vom Rechner auf dem Farbmonitor 2 erzeugten Maskenmusters eingeführt wird. Dies bringt erhebliche Vorteile in technischer wie in wirtschaftlicher Hinsicht. Da beim Messvorgang keine Teile bewegt werden müssen, können teure, mechanische Bewegungselemente für die Phasenschiebung sowie entsprechende Ansteuerlektronik entfallen. Da für die Messwertaufnahme keine bewegten Teile benötigt werden, steigt auch die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Messung. Außerdem dient der Bildschirm des Farbmonitors 2 (bzw. eine Projektionsoptik in anderen Ausführungsformen) gleichzeitig als Lichtquelle und (variable) Beluchtungsmaske. Es entfallen somit die herkömmlich aufzuwendenden Kosten für gesonderte Lichtquellen sowie die Kosten zur Herstellung herkömmlicher Masken (Substrat und

Strukturierung). Bemerkenswert ist auch die große Flexibilität erfindungsgemäßer Messsysteme. Form und Größe der Objektmuster sind leicht an die Messaufgabe adaptierbar. Dadurch kann ein großes Prüflingsspektrum ohne Umrüstung der mechanischen Teile des Messsystems geprüft werden.

[0056] Durch den Einsatz einer geeigneten Kombination von farbiger Lichtquelle (z. B. Farbmonitor) und dem "farbigen" Detektor kann simultan bei mehreren unterschiedlichen Wellenlängen geprüft werden, beispielsweise bei drei Wellenlängen, die den Grundfarben der additiven Farbmischung entsprechen. Es werden mehrere "Farbkanäle" simultan nutzbar, wobei jeder Farbkanal sein zugeordnetes Interferogramm erfasst. Auf diese Weise können chromatische Fehler einer zu prüfenden Abbildungsoptik in einem Messvorgang ermittelt werden (vgl. Fig. 6).

[0057] Hier ist beispielhaft eine Messung im sichtbaren Wellenlängenbereich (VIS) beschrieben. Es können sowohl für eine "einfarbige" als auch für eine "mehrfarbige" Messung, d. h. für eine Messung bei mehreren Wellenlängen (bereichen), auch Wellenlängen (bereiche) aus dem Infrarot (IR)- oder dem Ultraviolett (UV)- Bereich ausschließlich oder zusätzlich genutzt werden. Gegebenenfalls kann durch frequenzwandelnde Einrichtungen, z. B. geeignete Schichten im Strahlengang, ein Übergang zwischen Wellenlängenbereichen erzeugt werden. Beispielsweise kann bei Verwendung eines im VIS-Bereich strahlenden Monitors und einer frequenzwandelnden Sekundärstrahlerfläche, welche VIS-Licht absorbiert und im IR-Bereich abstrahlt, als Detektor eine IR-Kamera eingesetzt werden. Möglich sind auch strukturierbare Lichtquellen, die im IR- oder UV-Bereich strahlen.

[0058] Bei den folgenden Ausführungsbeispielen erfindungsgemäßer Messsysteme werden aus Gründen der Übersichtlichkeit gleiche oder funktional äquivalente Merkmale des Messsystems mit den gleichen Bezugszeichen bezeichnet wie in Fig. 1.

[0059] Die in Fig. 2 gezeigte zweite Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Messsystems 20 ist für die Detektion eines Prüflings 21 optimiert, der im Vergleich zum Prüfling 6 gemäß Fig. 1 eine größere objektseitige Brennweite hat. Bei dem Abbildungssystem 21 kann es sich beispielsweise um ein Teleobjektiv handeln. Der Messaufbau unterscheidet sich detektorseitig des Prüflings 21 nicht vom Aufbau gemäß Fig. 1. Auf der gegenüberliegenden Objektseite ist in der Objektebene 5 des zu prüfenden Abbildungssystems 21 eine ebene Leinwand 22 angeordnet. Diese ist Bestandteil der Mustererzeugungseinrichtung, welche weiterhin einen auf die Leinwand 22 gerichteten Farbprojektor 23 umfasst. Dieser dient als primäre Lichtquelle, mit der eine Struktur eines zweidimensionalen Objektmusters auf die ebene Leinwand 22 projiziert wird. Das dort reflektierte Muster ist das Objektmuster, welches von der zu prüfenden Optik 21 auf das Beugungsgitter 9 in der Bildebene 8 des Prüflings abgebildet wird. Bei anderen Ausführungsformen mit bildseitiger sekundärer Lichtquelle ist, anstatt der Leinwand 22 eine Mattscheibe vorgesehen, die von hinten beleuchtet und in Transmission genutzt werden kann. Messanordnungen mit objektseitigen Sekundärstrahlerflächen, beispielsweise nach Art von Leinwänden oder Mattscheiben, können in Verbindung mit projizierenden Primärlichtquellen beispielsweise dann vorteilhaft sein, wenn Prüfobjekte mit großen Brennweiten bzw. Bildebenenabständen in räumlich begrenzten Umgebungen vermessen werden sollen. Der Messablauf und die Auswertung der erzeugten Interferogramme kann analog dem Verfahren erfolgen, das im Zusammenhang mit Fig. 1 ausführlich beschrieben worden ist.

[0060] Das in Fig. 3 schematisch gezeigte Messsystem 25

verkörpert eine dritte Ausführungsform der Erfindung. Bei dieser umfasst die Mustererzeugungseinrichtung einen vom Steuerrechner 14 ansteuerbaren Projektor 26 als primäre, elektronisch strukturierbare Lichtquelle. Das von der Lichtquelle ausgehende Licht wird mittels eines schräg gestellten, ebenen Umlenkspiegels 27 in Richtung der zu prüfenden Abbildungsoptik 28 umgelenkt. In der Objektebene 5 des Prüflings 28 entsteht ein Zwischenbild mit dem Objektmuster, welches dann auf das Beugungsgitter 9 in der Bildebene 8 der Optik 2 abgebildet wird. Die Detektion und Auswertung der entstehenden Interferogramme verläuft analog zu den vorstehend beschriebenen Ausführungsformen. Zur Vermessung verschiedener Feldpositionen des Bildfeldes kann das Objektmuster elektronisch oder mechanisch in der Objektebene 5 verschoben werden.

[0061] Das in Fig. 4 gezeigte Messsystem 30 verkörpert eine vierte Ausführungsform der Erfindung und ist für eine mehrkanalige Vermessung einer zu prüfenden Optik 31 ausgebildet. Eine mehrkanalige Messung in diesem Sinne bedeutet, dass mehrere Feldpositionen der Prüfoptik simultan vermessen werden können, wobei idealerweise eine Verteilung von Feldpunkten gewählt wird, die eine zuverlässig Messung des gesamten Bildfeldes in einem Schritt ermöglicht. In diesem Fall kann auf Verschiebungseinrichtungen oder andere ein Scannen des Bildes ermöglichende Einrichtungen verzichtet werden. Das Messsystem 30 umfasst eine Rechneinheit 14, die einen Monitor 32 mit großer Bildfläche derart ansteuert, dass auf der Bildfläche des Monitors eine vorzugsweise regelmäßig Anordnung 36 von Teil-Flächen 37 vorliegt, die die gesamte Bildschirmfläche im wesentlichen ausfüllen und die jeweils identische beispielsweise rechtwinkelige Form haben. Diese Teil-Flächen werden von der Steuereinrichtung 14 so angesteuert, dass sie jeweils identische Strukturierung z. B. ein regelmäßiges, zweidimensionales Punktgitter aufweisen. Die Bildschirmfläche 33 ist in der Objektebene 5 der zu prüfenden Optik 31 angeordnet. Dies ermöglicht eine direkte Abbildung des Objektmusters in die Bildebene 8 des Prüflings 31 sowie einen kompakten Aufbau, da zwischen der selbstleuchtenden, strukturierbaren Lichtquelle 32 und dem Prüfling 31 keine weiteren optischen Komponenten vorgesehen sein müssen. Das von der Prüfoptik 31 in ihre Bildebene abgebildete Objektmuster trifft dort auf ein Beugungsgitter 9. Die hinter dem als Referenzmuster dienenden Beugungsgitter auftretenden Interferenzmuster fallen direkt, d. h. ohne Zwischenschaltung einer Sekundärstrahlerfläche, auf ein entsprechend große ausgebildeten CCD-Chip 34, einer Farbkamera 35. Es ist also auch auf der Bildseite ein Kompaktaufbau mit einem Minimum an Komponenten (Beugungsgitter, Kamera) realisiert. Die Vermessung als solche und die Auswertung der Interferogramme verläuft analog zu den bereits beschriebenen Vorrichtungen, allerdings mit dem Unterschied, dass jeweils Bildinformationen von mehreren Kanälen gleichzeitig erfasst und ausgewertet werden. Dies ermöglicht eine extrem schnelle Vermessung des gesamten Bildfeldes einer zu prüfenden Optik und einem Messaufbau, der völlig ohne bewegliche Teile auskommt.

[0062] Das Messsystem 40 in Fig. 5 verkörpert eine fünfte Ausführungsform der Erfindung. Es ist für die mehrkanalige Vermessung einer Kino-Projektionsoptik 41 vorgesehen, die für die Bestrahlung einer zylindrisch gekrümmten Kinoleinwand ausgelegt ist und dementsprechend eine zylindrisch gekrümmte Bildfläche 42 sowie eine ebene Objektfläche 8 hat, in der beim bestimmungsgemäßen Betrieb der zu projizierende Film verläuft. Die Vermessung der Projektionsoptik verläuft in umgekehrter Lichtlaufrichtung von Seiten der gekrümmten Bildfläche 42, die bei der Vermessung als zylindrisch gekrümmte Objektfläche 42 dient. In der Objekt-

fläche sind viele identische, separate Farbmonitore 44 so angeordnet, dass deren der Optik 41 zugewandene Bildschirmflächen mit der zylindrischen Objektfläche 42 zusammenfallen. Die Farbbildmonitore 44 werden durch die Rechneinheit 14 simultan mit identischen Strukturen angesteuert. Auf diese Weise können wie bei der Ausführungsform gemäß Fig. 4 eine Vielzahl von Feldpositionen gleichzeitig vermessen werden. Auf der Bildseite ist wieder ein Kompaktaufbau (nur Beugungsgitter 9 und Kamera 35 mit großem Kamerachip) analog der Ausführungsform gemäß 4 vorgesehen. Es ist auch möglich, anstatt der gezeigten zylindrischen Krümmung eine Objekt- bzw. Bildebene andere Krümmungen dieser Ebenen zu berücksichtigen, beispielsweise eine kalottenförmige Krümmung der Bildfläche eines Projektors für ein Planetarium. An der Stelle der Monitore 44 können auch Projektionssysteme vorgesehen sein, z. B. mit Punktlichtquellen und optimierter Projektionsoptik oder Laserprojektionssysteme.

[0063] Das Messsystem 50 in Fig. 6 verkörpert eine sechste Ausführungsform der Erfindung, mit der eine einkanalige, multichromatische Messung vorgenommen werden kann. Der Aufbau entspricht bis auf die Gestaltung des Detektors dem Aufbau in Fig. 1, weshalb die Komponenten jeweils mit entsprechenden Bezugszeichen bezeichnet sind. Der Detektor 51 umfasst eine Farbkamera mit drei räumlich getrennten CCD-Chips 52-54 und vorgeschalteter Strahlteilungseinrichtung 55. Jeder der CCD-Chips ist für die Erfassung einer der Grundfarben rot, grün und blau ausgelegt, so dass drei verschiedene Wellenlängen bzw. drei unterschiedliche relativ schmale Wellenlängenbereiche simultan erfasst werden können. Diese Anordnung berücksichtigt, dass für verschiedene, von Farbbildschirm 2 ausgesandte Wellenlängen jeweils gesonderte Interferogramme bzw. Überlagerungsmuster entstehen, die unabhängig voneinander sind und getrennt erfasst und ausgewertet werden können. Auf diese Weise können schnell und zuverlässig Farbfehler eines Prüflings ermittelt werden, wobei die drei Farben als Stützstellen beispielsweise für eine Dispersionskurve dienen können.

[0064] Die an Hand der Fig. 1-6 beispielhaft erläuterten Ausführungsformen nutzen jeweils selbstleuchtende, strukturierbare Lichtquellen, beispielsweise mit farbigen oder monochromatischen Bildschirmen oder Projektoren, wodurch die Funktionen von Lichtquelle und Beleuchtungsmaske, welche bei herkömmlichen Vermessungssystemen gesonderte Einheiten sind, in einer Einheit integriert werden können. Die an Hand von Fig. 7 erläuterte siebte Ausführungsform der Erfindung beschreibt beispielhaft eine andere Möglichkeit, mit Hilfe einer elektronisch ansteuerbaren Mustererzeugungseinrichtung im Bereich einer Objektfläche eines Abbildungssystems ein abzubildendes Objektmuster zu erzeugen. Bei dem Messsystem 60 in Fig. 7 umfasst die Mustererzeugungseinrichtung eine Lichtquelle 61, deren Licht mit Hilfe einer nachgeschalteten Beleuchtungsoptik 62 auf eine durch die Rechneinheit 14 elektronisch ansteuerbare Maskeneinheit 63 gerichtet ist, die sich in der Objektebene 5 des zu prüfenden Abbildungssystems 64 befindet. Die elektronisch ansteuerbare Maskeneinheit ersetzt die bei herkömmlichen Vermessungssystemen üblichen, beleuchtungsseitigen, starren Chrommasken. Die Maskeneinheit kann eine elektronisch ansteuerbare, in Transmission (wie in Fig. 7 gezeigt) oder Reflexion veränderbare Matrixstruktur aufweisen. Sie kann beispielsweise nach Art eines Flüssigkeitskristall-Arrays aufgebaut sein. Die elektronisch ansteuerbare Maskeneinheit kann zum einen die Funktion herkömmlicher Transmissionsmasken oder Reflexionsmasken übernehmen, zum anderen auch z. B. die Funktion des Phasenschiebers, indem die Lage eines (in sich unveränderten)

Musters auf elektronischem Wege softwaregesteuert verschoben wird. In der Maskeneinheit sind beispielsweise Elemente wie Flüssigkristall-Arrays oder ähnliche schaltbare Elemente verwendbar, deren Reflexions- oder Transmissions-eigenschaften orts aufgelöst durch elektronische Ansteuerung variierbar sind. Hinsichtlich der einfachen Veränderbarkeit von Objektmustern ergeben sich die gleichen Vorteile wie bei den oben genannten Ausführungsformen, da sich Form und Größe der Gitterelemente flexibel an die jeweilige Messaufgabe anpassen lassen. Ein Austausch von individuellen Bauteilen (herkömmlichen Chrommasken) mit der Notwendigkeit von Neujustage entfällt ebenso wie die Herstellungskosten der Bauteile. Auch ist die Phasenschiebung oder auch eine andere Bewegung des Objektmusters ohne mechanische Bewegung durch Verschieben des elektronisch erzeugten Gittermusters realisierbar, wodurch teure Präzisionsmechanik und deren Ansteuerungselektronik eingespart werden kann.

[0065] Ein weiterer großer Vorteil von elektronisch kontrollierbaren Masken bzw. Mustern der hier beschriebenen Art ist die Möglichkeit, eine automatisierte Kalibrierung und Anpassung des Messbereichs durchzuführen. Dies kann beispielsweise dadurch erfolgen, dass einem Grundmuster ein geeignetes Intensitätsprofil, d. h. ein gezielter Intensitätsverlauf über die Bildfläche, überlagert wird. Dadurch wird die Möglichkeit geschaffen, eine detektorseitige Kennlinie, beispielsweise die Kamera-Kennlinie inklusive der Analog/Digital-Wandlung (Digitalisierter Helligkeitswert der Pixel) und die Senderkennlinie, d. h. den Intensitätsverlauf auf Seiten der Lichtquelle, aufeinander abzustimmen. Diese "Senderkennlinie" wird insbesondere beeinflusst durch die Lichtquellenseite Digital/Analog-Wandlung, die Helligkeit der Monitorpixel, die Berücksichtigung der spektralen Reflektivität oder Transmission eines Sekundärstrahlers (Leinwand, Bildleiter, Mattscheibe) sowie die Transmission des Prüflings. Neben Nicht-Linearitäten von Analog-/Digital-Wandlern oder Digital/Analog-Wandlern ist auch auf die spektrale Abhängigkeit der Empfindlichkeit des Detektor bzw. der Sensorfläche zu achten, insbesondere dann, wenn ein Intensitätsabfall zum Pupillenrand (normalerweise proportional zu \cos^4) durch einen angepassten Intensitätsverlauf in der Maskenbeleuchtung ausgeglichen werden soll. Hierdurch kann ein Graufilter entsprechend der Funktion emuliert werden. Gesonderte Graufiltereinheiten, wie sie in herkömmlichen Vermessungseinrichtungen gelegentlich verwendet werden, werden dadurch entbehrlich. Durch entsprechende Beeinflussung des Intensitätsverlaufs elektronisch erzeugter Maskenstrukturen lassen sich demnach auf einfache Weise Übertragungsketten linearisieren und es kann detektorseitig eine maximale Modulationstiefe bzw. maximaler Kontrast bei günstigstem Signal/Rausch-Verhältnis erreicht werden. Es ist auch möglich, den Messbereich zu normieren, um Untersteuerungsgrenzen und Sättigungsgrenzen zu erfassen.

[0066] In Fig. 8 ist ein schematisch ein Messsystem 65 gezeigt, bei dem zur Erzeugung des Objektmusters eine durch eine Leinwand gebildete Sekundärstrahlerfläche 66 mit einem relativ zur Sekundärstrahlerfläche gesteuert beweglichen Lichtstrahl 67 derart bestrahlt wird, dass innerhalb eines Schreib-Zeitintervalls das Objektmuster auf die Sekundärstrahlerfläche "geschrieben" wird. Für diese schreibende Projektion wird ein Laserprojektor 68 oder eine ähnliche schreibende Lichtquelle durch eine Rechneinheit 14 angesteuert. Die Steuerung des Lichtstrahls erfolgt mit sehr hoher Geschwindigkeit, beispielsweise mit Hilfe eines im Projektor 68 vorhandenen, ultraschnellen Scannerspiegels, der den Auftreffpunkt des Lichtstrahls 67 auf die Leinwand 66 schnell verschiebt. Die Rechneinheit 14 steuert auch die

als Detektor dienende Kamera 11, wobei die Belichtungszeit der Kamera und die "Schreibzeit" für das Maskenmuster so synchronisiert sind, dass innerhalb der Belichtungszeit das gesamte Maskenmuster mindestens einmal "geschrieben" wurde. Dazu ist das Schreib-Zeitintervall, innerhalb dessen das gesamte Muster mindestens einmal vom Lichtstrahl durchfahren wurde, kleiner oder maximal gleich der Belichtungszeit zu wählen. Es ist auch möglich, eine schreibende Projektion mit mehreren Lichtstrahlen durchzuführen, wobei gegebenenfalls von einem Lichtstrahl jeweils nur Teilbereiche des gesamten Objektmusters geschrieben werden. Der übrige Aufbau des Messsystems mit Prüfling 6, Beugungsgitter 9 und Mattscheibe 10 entspricht dem Aufbau, wie er bereits in Fig. 1 gezeigt und dort näher beschrieben ist.

[0067] Die vorstehenden Beispiele wurden an Hand interferometrischer Messsysteme erläutert, wobei insbesondere eine nach Art eines Shearing-Interferometers arbeitende Vorrichtung zur Wellenfronterfassung gemäß der DE 101 09 929 genutzt werden kann. In diesem System findet sich in der Bildebene des Abbildungssystems ein als Beugungsgitter ausgebildetes Referenzmuster. Erfasst und ausgewertet werden die durch Überlagerung der durch Beugung erzeugten Wellen entstehenden Überlagerungsmuster (Interferogramme). Die Erfindung kann jedoch auch bei anderen Messtechniken genutzt werden, beispielsweise solchen, die den Moiré-Effekt ausnutzen. Hier werden in erster Linie durch Überlagerung von Hell-Dunkel-Mustern entstehende Hell-Dunkel-Überlagerungsmuster ausgewertet. Ein Beispiel eines Moiré-Messsystems 70 zur Bestimmung der Verzeichnung eines Prüflings 71 ist in Fig. 9 gezeigt. In der Objektebene 5 des Prüflings 71 befindet sich die Bildfläche eines Monitors 72, der von einem Rechner 14 angesteuert wird, welcher wiederum auch eine als Detektor dienende Kamera 73 steuert und die von der Kamera kommenden Signale verarbeitet. Die Kamera 73 hat als Sensorfläche einen CCD-Chip 74, dessen Sensorelemente mit einer transparenten Abdeckung, beispielsweise einem Deckglas 75 abgedeckt und geschützt sind. Direkt auf dem Deckglas ist ein Referenzmuster bzw. Bildgitter in der Bildebene 8 des Prüflings 71 aufgebracht. Das dazugehörige Objektmuster wird auf elektronischem Wege durch den Monitor 72 in der Objektebene 5 erzeugt. Wird das Objektmuster mit der Prüfoptik 71 auf das Bildmuster abgebildet, so erfasst der CCD-Chip ein zweidimensionales Intensitätsmuster, das durch die Überlagerung von abgebildeten Objektmuster und Referenzmuster entsteht und Information über die Abbildungsqualität der Prüfoptik 71 enthält. Die Durchführung und Auswertung solcher Moiré-Verfahren ist dem Fachmann bekannt und wird hier daher nicht näher erläutert.

[0068] Das Messsystem 80 in Fig. 10 ist ebenfalls für eine Verzeichnungsmessung mit Moiré-Technik ausgelegt und unterscheidet sich von Messsystem 70 in Fig. 9 nur hinsichtlich der detektorseitigen Elemente. Im Bereich der ebenen Bildfläche 8 befindet sich das Referenzmuster. Im unmittelbaren Bereich des Referenzmusters, insbesondere direkt in der Bildebene oder sehr dicht dahinter, befindet sich eine Sekundärstrahlerfläche 81, welche als Streufläche und/oder Frequenzwandlerfläche ausgebildet sein kann. Eine Streuscheibe in diesem Bereich kann zur Zerstörung der räumlichen Kohärenz dienen und unterdrückt damit den Talbot-Effekte. Der Talbot-Effekt erzeugt hinter dem Referenzgitter in periodischen Abständen eine Selbstabbildung des Gitters und damit weitere "falsche" Moiré-Streifensysteme und würde daher zur Verfälschung des Messergebnisses führen. Der Abstand der Talbot-Ordnungen hängt von Gitterperiode und Wellenlänge ab. Wenn eine Frequenzwandlung erforderlich ist, weil beispielsweise der spektrale Empfindlich-

keitsbereich des Detektors 11 nur unzureichend an den spektralen Emissionsbereich der strukturierten Lichtquelle 72 angepasst ist, kann dies beispielsweise über ein dünnes, fluoreszierendes Gittersubstrat auf einem dicken Glasträger realisiert sein oder durch ein Sandwich mit einem relativ dünnen, transparenten Gittersubstrat auf einem dicken Trägersubstrat mit dazwischenliegender Fluoreszenzschicht, die beispielsweise einen Optik-Kitt enthalten kann, in den fluoreszierendes Pulver eingemischt ist. In jedem Fall wird die im Bereich der Bildebene entstehende Intensitätsverteilung mit Hilfe einer Abbildungsoptik 82 auf die Sensorfläche des Detektors 11 abgebildet. Da das Referenzgitter mit einer Mattscheibe oder einer anderen Sekundärfläche in der Bildebene 8 steht, bildet die Abbildungsoptik 82 direkt das dortige Bildfeld auf die Sensorfläche der Kamera ab.

[0069] An Hand des Messsystems 85 in Fig. 11 wird nun ein durch die Erfindung ermöglichtes, neuartiges Messverfahren erläutert, welches als wesentliches Element die Verwendung von radialsymmetrischen Musterstrukturen beinhaltet, bei denen eine Phasenschiebung in radialen Richtungen möglich ist. Insbesondere ermöglicht die elektronische Mustererzeugung eine simultane, äquidistante Phasenschiebung von Radialgittern. Simultane, äquidistante Phasenstufen erleichtern die Phasenauswertung erheblich. Das Verfahren kann insbesondere bei Shearing-Interferometern und bei Moiré-Verfahren eingesetzt werden. Besonders nützlich ist hierbei die Erzeugung bzw. Verwendung rotationssymmetrischer Muster, die einen Spezialfall radialsymmetrischer Muster darstellen und insbesondere dort mit großem Vorteil einsetzbar sind, wo rotationssymmetrische Fehler interessieren bzw. dominant sind. Dies kann insbesondere bei der Asphärenprüfung der Fall sein, wo bei großer Asphärizität ein großer Dynamikbereich erforderlich ist, der über die Gitterperiode anpassbar ist.

[0070] Das Beispiel in Fig. 11 zeigt einen möglichen Aufbau eines Radial-Shearing-Interferometers zur Wellenfrontmessung einer Einzellinse 86, die sowohl sphärisch als auch asphärisch sein kann. Die Mustererzeugungseinrichtung umfasst einen von einem Rechner 14 angesteuerten Monitor 2, der als zweidimensional strukturierbare, inkohärente Lichtquelle des Messsystems dient. Das Bild des Monitors wird über eine Abbildungsoptik 3 auf die Eintrittsfläche eines flexiblen Bildleiters 4 abgebildet, dessen Austrittsfläche in der Objektebene 5 des Prüflings 86 angeordnet ist. Das Austrittsende des Bildleiters ist zweidimensional senkrecht zur optischen Achse verfahrbar. In der Bildebene 8 des Prüflings 86 ist das Beugungsgitter 9 angeordnet. Diesem ist ein Mikroskopobjektiv 87 nachgeschaltet, welches die Wellenfronten des Überlagerungsmusters auf die Sensorfläche 12 der Kamera 11 lenkt.

[0071] Die interferometrische Durchtrittsprüfung von Einzellinsen erfordert auf Grund der großen sphärischen Aberration in der Regel eine Kompensationsoptik, da die Wellenfrontgradienten zu räumlich sehr dichten Interferenzstreifen führen und damit gegebenenfalls von Detektor nicht mehr aufgelöst werden können. Die Kompensationsoptik hat die Aufgabe, die durch den Prüfling erzeugten großen Gradienten zu kompensieren, damit die verbleibenden Wellenfrontdeformationen in den Auflösungsbereich des Interferometers fallen. Wird eine Kompensationsoptik verwendet, so ist es möglich Standard-Interferometer, wie beispielsweise Fizeau-Typen oder Twyman-Green-Typen zu verwenden. Allerdings können Kompensationsoptiken aufwendig sein, da sie normalerweise individuell für jeden Prüfling ausgelegt und kalibriert werden müssen. Typisch ist die Kompensation von rotationssymmetrischen Aberrationen, da sie durch Kombinationen von sphärischen Einzellinsen erzielt werden kann.

[0072] Eine Besonderheit liegt nun darin, dass der Monitor 2 ein rotationssymmetrisches Objektmuster erzeugt, das aus konzentrisch angeordneten kreisförmigen Linien besteht (vgl. Fig. 12). Das Beugungsgitter 9 hat eine entsprechende, rotationssymmetrische Struktur mit konzentrischen Kreislinien.

[0073] Bei jedem Messverfahren, das eine Phasenschiebung von Gitterlinien beinhaltet, muss grundsätzlich das Gittermuster senkrecht zu den Gitterlinien geschoben werden, wobei die Gitterkonstante erhalten bleiben muss. So ist beim eingangs erwähnten Lateral-Shearing-Interferometer eine einfache lineare Verschiebung des gesamten Gitters in eine Richtung senkrecht zu Gitterlinien erforderlich. Entsprechend ist im Falle eines rotationssymmetrischen Musters ebenfalls eine Verschiebung senkrecht zu den kreisförmigen Gitterlinien erforderlich, also in Radialrichtungen 89 bezüglich des Symmetriezentrums 90, welches gleichzeitig das Verschiebungszentrum der Phasenschiebung darstellt. Eine solche Radialverschiebung, bei der die Gitterperiode, d. h. der radiale Abstand der Gitterlinien erhalten bleiben muss, ist bei starren Gittern (z. B. Chrom auf Glas) prinzipiell nicht möglich. Bei Gittern auf dehnbaren Trägern wäre eine Dehnung oder Stauchung zwar denkbar, dies würde jedoch die Gitterkonstante verändern. Die Erfindung ermöglicht jedoch die Phasenschiebung in Radialrichtung bei konstanter Gitterperiode. Wie in Fig. 13 schematisch gezeigt, liegen die Beugungsordnungen in Richtung senkrecht zu den Gitterlinien. Diese entsprechen auch den Scherrichtungen bzw. Phasenschieberichtungen. Eine unveränderte Gitterperiode bei der Phasenschiebung bewirkt, dass die Beugungswinkel in Radialrichtung beim Phasenschieben konstant bleiben, was die Auswertung erheblich vereinfacht. Die durch dieses Verfahren erhältlichen Interferogramme (Scherogramme) liefern somit die Wellenfrontdifferenzen in radialer Richtung.

[0074] Die Erfindung ermöglicht es auch, die Geometrie des Objektmusters auf einfache Weise an die Messaufgabe anzupassen. Als ein Beispiel zeigt Fig. 14 ein radialsymmetrisches Objektmuster 92 mit vierzähliger Symmetrie, welches nach jeweils 90°-Drehung um sein Symmetriezentrum 93 in sich selbst überführt wird. Das Muster hat vier jeweils senkrecht zueinander stehende Gitterrichtungen, in denen jeweils äquidistante, geradlinige Gitterlinien 94 liegen. Zu dem Muster gehören zwei orthogonale Beugungsrichtungen (Pfeile). Derartige Muster können beispielsweise zur Prüfung von Pyramiden, Würfecken oder ähnlichen Geometrien verwendet werden. Die senkrecht zu den Gitterlinien bzw. in Richtung der Beugungsordnungen verlaufenden Schieberichtungen in den Quadranten können gleichgerichtet oder entgegengesetzt sein. Auch radialsymmetrische Muster bzw. Gitter mit mehr oder weniger als vierzähliger Symmetrie sind möglich. Eine geschickte Wahl der Verschieberichtungen kann die richtige Vorzeichenbestimmung bei der Auswertung der Messergebnisse erleichtern.

[0075] Bei Mustern oder Gittern mit radialer Symmetrie kann es zu Problemen der Vorzeichenbestimmung beim Phasenschieben kommen. Bei einem Radialmuster wird die Phasenlage des Gitters in radialer Richtung verändert. Das bedeutet, dass sich über dem Durchmesser das Vorzeichen umkehrt und zwar im Mittelpunkt bzw. Verschiebungszentrum. Damit ändert auch das Phasenergebnis sein Vorzeichen, was bei der Phasenberechnung berücksichtigt werden muss. Da es eventuell nicht eindeutig ist, wo die Vorzeichenumkehr stattfinden muss, ist es zur Überprüfung der Vorzeichen und zur Konsistenzprüfung der Messung vorteilhaft, zusätzlich zu einer radialen Phasenverschiebung eine laterale Phasenschiebung (Linearverschiebung) entlang eines Radius oder entlang mehrerer Radien durchzuführen. Dies

bedeutet einen Versatz des gesamten Musters um Bruchteile der Gitterperiode entlang eines oder mehrer Durchmesser auf Linien, die durch den Symmetrieursprung (Verschiebungszentrum) führen. Damit ist die Phasenschiebung über den gesamten Durchmesser gleichgerichtet und der Ort der Vorzeichenänderung ist eindeutig bestimmbar. Wenn die laterale Phasenschiebung in zwei im Winkel zueinander stehenden Richtungen zueinander durchgeführt wird, die beispielsweise senkrecht aufeinander stehen, kann auch die Mittelpunktskoordinate, d. h. die Koordinate des Verschiebungszentrums, eindeutig bestimmt werden.

[0076] Fig. 15 und 16 zeigen zwei andere Möglichkeiten, die Gitter-/Maskenkombination bezüglich Periodizität des Musters und Periodizitätsrichtung bzw. Gitterorientierung an die jeweilige Messaufgabe anzupassen. Das Objektmuster 95 in Fig. 15 ist für die Vermessung von Prüflingen mit zwei Brennweiten vorgesehen. Es hat zwei Bereiche bzw. Zonen 96, 97 mit unterschiedlicher Gitterperiode von jeweils rotationssymmetrischen Mustern, wobei die kleine, kreisförmige Zone 97 ein vollständiges rotationssymmetrisches Muster und die große, im wesentlichen kreisbogenförmige Zone 96 ein unvollständiges rotationssymmetrisches Muster größerer Gitterperiode bildet. Die Phasenschiebung jeweils in Radialrichtung zu den Musterzentren kann für die verschiedenen Zonen separat durchgeführt werden. Ausgewertet werden in der beim Phasenschieben üblichen Weise jeweils lokale Wechselsignale.

[0077] In Fig. 16 ist ein Objektmuster 100 gezeigt, welches innerhalb einer kreisrunden Musterfläche einen kontinuierlichen Verlauf sowohl der Periodizitätsrichtung (jeweils lokal senkrecht zu den Gitterlinien) und der Periodizität bzw. des Gitterlinienabstandes zeigt. So ist in der gestrichelt umfassten Zone 101 der Gitterabstand der Gitterlinien größer als in der gestrichelt umfassten Zone 102 und die Periodizitätsrichtungen 103, 104, welche den Scherrichtungen bzw. den Verschiebungsrichtungen entsprechen, stehen in einem Winkel von ca. 20° zueinander. Zwischen diesen Zonen findet ein kontinuierlicher Übergang sowohl der Periodizitätslänge, als auch der Periodizitätsrichtung statt. Bei einer Messung kann wiederum die Phasenschiebung für verschiedene Zonen, die jeweils geeignet räumlich begrenzt werden können, separat durchgeführt werden. Derartige Muster sind beispielsweise geeignet zur Prüfung von asphärischen Brillengläsern oder Gleitsichtgläsern, bei denen die Brechkraft einen kontinuierlichen Verlauf über die jeweilige Linse zeigt.

[0078] In Fig. 17 wird ein Beispiel eines insgesamt kreisförmigen, rotationssymmetrischen Objektmusters 105 gezeigt, welches belegt, dass Dank der Erfindung auch nicht-digitale Masken bzw. Musterstrukturen leicht generierbar sind. Als nicht-digital werden hier solche Muster bezeichnet, deren Transparenzfunktion (bzw. Reflektivitätsfunktion) nicht nur die Werte 0 und 1 annehmen kann, also Muster mit Graustufen. Derartige Muster sind herkömmlich nur relativ aufwendig, beispielsweise mit dithering-Techniken herzustellen. Bei der elektronischen Mustererzeugung dagegen ist der steuerungstechnische Aufwand kaum größer als bei digitalen Mustern, wie sie beispielsweise in den Fig. 14 bis 16 gezeigt sind. Das Muster 105 hat eine in Radialrichtung sinusförmige Transparenzfunktion, also eine in Radialrichtung kontinuierliche Variation zwischen Werten nahe 0 und Werten nahe 1. Eine derartige Maske mit sinusförmiger Transparenzfunktion optimiert den Interferenzkontrast für die nullte Ordnung und die ersten Ordnungen der Beugungen. Der Kontrast für alle anderen Ordnungen (Störterme) wird dagegen perfekt unterdrückt. Ebenso können Gaussförmige "Löcher" geeignet sein, Störterme zu unterdrücken. Derartige Masken mit Graustufen erleichtern damit die Aus-

wertungen der Messungen und können zu erhöhter Messgenauigkeit führen. Masken bzw. Muster mit Graustufen in zumindest einem Teil der Musterfläche können nicht nur bei den hier beispielhaft beschriebenen Mustertypen nützlich sein, sondern auch bei herkömmlichen Mustern, beispielsweise bei Kreuzgittern, Lineargittern, Schachbrettgittern oder dergleichen.

Patentansprüche

1. Messverfahren zur Vermessung der Abbildungsqualität eines optischen Abbildungssystems mit folgenden Schritten:
Erzeugung mindestens eines abzubildenden Objektmusters im Bereich der Objektfläche des Abbildungssystems mit Hilfe mindestens einer elektronisch ansteuerbaren Mustererzeugungseinrichtung;
Bereitstellung eines dem abzubildenden Objektmuster angepassten Referenzmusters im Bereich der Bildfläche des Abbildungssystems;
Überlagerung einer Abbildung des Objektmusters mit dem Referenzmuster zur Erzeugung eines Überlagerungsmusters;
Ortsauflösende Detektion des Überlagerungsmusters;
Ermittlung mindestens eines die Abbildungsqualität des Abbildungssystems beschreibenden Abbildungsparameters aus dem Überlagerungsmuster.
2. Verfahren nach Anspruch 1 mit folgendem Schritt: Veränderung des Objektmusters durch elektronische Ansteuerung der Mustererzeugungseinrichtung zur elektronischen Erzeugung eines gegenüber einem Grundzustand veränderten Objektmusters, wobei vorzugsweise zur Veränderung des Objektmusters keine mechanische Bewegung von Teilen stattfindet.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, gekennzeichnet durch eine Veränderung des Objektmusters, wobei die Veränderung eine Verschiebung des Objektmusters in der Objektfläche umfasst.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Veränderung des Objektmusters, wobei die Veränderung eine Verdrehung des Objektmusters in der Objektfläche umfasst.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Veränderung des Objektmusters, wobei die Veränderung eine Dehnung oder eine Stauchung eines Grundmusters umfasst.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Veränderung des Objektmusters, wobei das Objektmuster ein Verschiebungszentrum aufweist und die Veränderung eine Verschiebung von Musterstrukturen in radialen Richtungen relativ zu dem Verschiebungszentrum umfasst.
7. Verfahren nach Anspruch 6, bei dem während der Verschiebung die Periodizität der Musterstrukturen in den radialen Richtungen unverändert bleibt.
8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, bei dem die Verschiebung zusätzlich eine laterale Verschiebung von Musterstrukturen in mindestens einer Radialrichtung umfasst.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem ein Objektmuster erzeugt wird, das mindestens bereichsweise eine bezogen auf ein Symmetriezentrum radialsymmetrische Strukturen aufweist, wobei vorzugsweise ein rotationssymmetrisches Objektmuster erzeugt wird.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem ein Objektmuster erzeugt wird, das innerhalb seiner Musterfläche einen vorzugsweise kontinuierlichen Verlauf einer Periodizitätsrichtung und/oder einen vorzugsweise kontinuierlichen Verlauf der Periodizität der Musterstruktur aufweist.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem ein Objektmuster erzeugt wird, das mehrere zweidimensionale Bereiche mit unterschiedlicher Periodizität und/oder Periodizitätsrichtung der Musterstruktur aufweist.
12. Verfahren nach Anspruch 10 oder 11, gekennzeichnet durch eine Mehrfachverschiebung von Objektmustern, bei der die Verschiebung von Musterstrukturen für mehrere Bereiche unterschiedlicher Periodizitätsrichtung und/oder Periodizität der Musterstrukturen separat in unterschiedliche Verschiebungsrichtungen und/oder um unterschiedliche Verschiebungswege durchgeführt wird.
13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Veränderung des Objektmusters, wobei die Veränderung eine Überlagerung des Objektmusters mit einem vorgebbaren Intensitätsprofil umfasst.
14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Veränderung des Objektmusters, wobei die Veränderung eine Überlagerung des Objektmusters mit einem vorgegebenen Verzerrungsprofil umfasst.
15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Objektmuster derart erzeugt wird, das es in mindestens einer in der Objektmusterfläche liegenden Richtung mindestens abschnittsweise eine kontinuierliche Variation seiner Transmissionseigenschaften oder Reflexionseigenschaften aufweist.
16. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zur Erzeugung des Objektmusters eine selbstleuchtende, elektronisch zweidimensional strukturierbare Beleuchtungseinheit verwendet wird, wobei die Beleuchtungseinheit vorzugsweise mindestens einen Bildschirm und/oder mindestens einen Projektor umfasst.
17. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zur Erzeugung des Objektmusters mindestens eine teilweise transparente Maske mit einer elektronisch erzeugbaren und/oder veränderbaren, zweidimensionalen, lichtundurchlässigen Maskenstruktur verwendet wird.
18. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zur Erzeugung des Objektmusters mindestens eine teilweise reflektierende Maske mit einer elektronisch erzeugbaren und/oder veränderbaren, zweidimensionalen, reflektierenden Maskenstruktur verwendet wird.
19. Verfahren nach Anspruch 17 oder 18, bei dem als Maske mindestens ein elektronisch ansteuerbares Bauelement verwendet wird, das für eine ortsauflösende Variation seiner Transmissionseigenschaften oder Reflexionseigenschaften ausgebildet ist, insbesondere ein Flüssigkristall-Array.
20. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche mit folgenden Schritten:
Durchstrahlung des optischen Abbildungssystems mit Licht mehrerer unterschiedlicher Wellenlängen;
Ortsauflösende Detektion von mehreren, unterschiedlichen Wellenlängen zugeordneten Überlagerungsmustern.
21. Verfahren nach Anspruch 20, bei dem das Abbildungssystem gleichzeitig mit Licht mehrerer unterschiedlicher Wellenlängen durchstrahlt wird und eine gleichzeitige Detektion von unterschiedlichen Wellen-

längen zugeordneten Überlagerungsmustern stattfindet.

22. Verfahren nach Anspruch 20 oder 21 gekennzeichnet durch eine Ermittlung mindestens eines Abbildungsparameters als Funktion von bei unterschiedlichen Wellenlängen erfassten Überlagerungsmustern.

23. Verfahren nach einem der Ansprüche 20 bis 22, gekennzeichnet durch eine Verwendung einer mehrfarbigen Lichtquelle, die zur, vorzugsweise gleichzeitigen, Aussendung von Licht mehrerer unterschiedlicher Wellenlängen ausgebildet ist.

24. Verfahren nach einem der Ansprüche 20 bis 23, gekennzeichnet durch die Verwendung eines für mehrere Wellenlängen empfindlichen, ortsauflösenden Detektors, wobei der Detektor vorzugsweise mindestens eine Farbkamera umfasst.

25. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zur Erzeugung des Objektmusters Licht aus dem sichtbaren Spektralbereich genutzt wird.

26. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Erzeugung von Objektmustern an verschiedenen Feldorten der Objektfläche des Abbildungssystems.

27. Verfahren nach Anspruch 26, dadurch gekennzeichnet, dass gleichzeitig an mehreren Feldorten der Objektfläche Objektmuster erzeugt werden (Mehrkanalmessung).

28. Verfahren nach Anspruch 26 oder 27 bei dem zur Messung an mehreren Feldorten mindestens ein Objektmuster zwischen den Messungen zwischen Feldorten verschoben wird.

29. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zur Erzeugung des Objektmusters mindestens eine Sekundärstrahlerfläche bestrahlt wird, die vorzugsweise im Bereich der Objektfläche des zu vermessenden Abbildungssystems angeordnet ist.

30. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zur Erzeugung des Objektmusters eine Sekundärstrahlerfläche mit mindestens einem relativ zu der Sekundärstrahlerfläche gesteuert beweglichen Lichtstrahl derart bestrahlt wird, dass innerhalb eines Schreib-Zeitintervalls das Objektmuster geschrieben wird.

31. Messsystem zur Vermessung der Abbildungsqualität eines optischen Abbildungssystems mit: einer Einrichtung zur Erzeugung mindestens eines Objektmusters im Bereich der Objektfläche (5; 42) des Abbildungssystems (6; 21; 28; 31; 41; 64; 71; 86), wobei diese Einrichtung mindestens eine zur Ansteuerung der Mustererzeugungseinrichtung (2; 23; 26; 33; 44; 63; 68; 72) ausgebildete Steuereinheit (14) umfasst; einem im Bereich der Bildfläche (8) des optischen Abbildungssystems angeordneten, dem Objektmuster angepassten Referenzmuster (9); einem Detektor (11; 35; 51; 73) zur ortsauflösenden Detektion eines Überlagerungsmusters; und einer Einrichtung (14) zur Ermittlung mindestens eines die Abbildungsqualität des Abbildungssystems beschreibenden Abbildungsparameters aus dem Überlagerungsmuster.

32. Messsystem nach Anspruch 31, bei dem die Mustererzeugungseinrichtung mindestens eine selbstleuchtende, elektronisch zweidimensional strukturierbare Beleuchtungseinheit umfasst, wobei die Beleuchtungseinheit vorzugsweise mindestens einen Bildschirm (2; 32; 44; 72) und/oder mindestens einen Projektor (23; 26; 68) aufweist.

33. Messsystem nach Anspruch 31 oder 32, bei dem die Mustererzeugungseinrichtung mindestens eine teilweise transparente Maske (63) mit einer elektronisch erzeugbaren und/oder veränderbaren zweidimensionalen, lichtundurchlässigen Maskenstruktur aufweist.

34. Messsystem nach einem der Ansprüche 31 bis 33, bei dem die Mustererzeugungseinrichtung mindestens eine teilweise reflektierende Maske mit einer elektronisch erzeugbaren und/oder veränderbaren zweidimensionalen, reflektierenden Maskenstruktur aufweist.

35. Messsystem nach Anspruch 33 oder 34, bei dem die Maske (63) mindestens ein Flüssigkristall-Array aufweist.

36. Messsystem nach einem der Ansprüche 31 bis 35, bei dem die Objektfläche (42) einachsrig oder mehrachsrig gekrümmt ist.

37. Messsystem nach einem der Ansprüche 31 bis 36, bei dem im Bereich der Objektfläche mindestens eine reflektierende oder transmittierende Sekundärstrahlerfläche (22; 66) angeordnet ist.

38. Messsystem nach einem der Ansprüche 31 bis 37, bei dem die Mustererzeugungseinrichtung mindestens einen Projektor (68) zur Erzeugung mindestens eines auf eine Sekundärstrahlerfläche (66) ausrichtbaren und bezüglich der Sekundärstrahlerfläche gesteuert bewegbaren Lichtstrahls umfasst (Schreib-Projektor).

39. Messsystem nach einem der Ansprüche 31 bis 38, bei dem die Mustererzeugungseinrichtung mindestens einen Umlenkspiegel (27) umfasst.

40. Messsystem nach einem der Ansprüche 31 bis 39, bei dem der Detektor mindestens eine Sekundärstrahlerfläche (10; 81) zugeordnet ist.

41. Messsystem nach Anspruch 40, bei dem mindestens eine Sekundärstrahlerfläche (81) im unmittelbaren Bereich des Referenzmusters angeordnet ist.

42. Messsystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Detektor (73) mindestens eine mit einer transparenten Abdeckung (75) abgedeckte Sensorfläche, insbesondere einen CCD-Chip (74) umfasst, wobei das Referenzmuster unmittelbar an der Abdeckung angeordnet ist.

43. Messsystem nach einem der Ansprüche 31 bis 42, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtung zur Erzeugung des Objektmusters für den Betrieb bei mehreren, unterschiedlichen Wellenlängen ausgebildet ist, die vorzugsweise simultan erzeugbar sind.

44. Messsystem nach einem der Ansprüche 31 bis 43, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtung zur Erzeugung des Objektmusters mindestens einen Farbmonitor (2) oder mindestens ein Muster mindestens einen Farbmonitor (2) oder mindestens einen Farbprojektor aufweist.

45. Messsystem nach einem der Ansprüche 31 bis 44, bei dem der Detektor (11; 5) zur Erfassung von Überlagerungsmustern von mehreren unterschiedlichen Wellenlängen ausgebildet ist, wobei der Detektor vorzugsweise eine Farbkamera umfasst.

46. Messsystem nach einem der Ansprüche 31 bis 45, dadurch gekennzeichnet, dass es zur Vermessung von verschiedenen Feldpunkten des Abbildungssystems ausgebildet ist.

47. Messsystem nach Anspruch 46, dadurch gekennzeichnet, dass es zur gleichzeitigen Vermessung unterschiedlicher Feldpunkte des Abbildungssystems ausgebildet ist (Mehrkanalmessung).

48. Messsystem nach einem der Ansprüche 31 bis 47, dadurch gekennzeichnet, dass es frei von mechanisch beweglichen Bauteilen ist.

49. Messsystem nach einem der Ansprüche 31 bis 48,
dadurch gekennzeichnet, dass es als Shearing-Interfe-
rometer ausgebildet ist.

50. Messsystem nach einem der Ansprüche 31 bis 48,
dadurch gekennzeichnet, dass es zur Durchführung ei- 5
nes Moiré-Verfahrens ausgebildet ist.

Hierzu 7 Seite(n) Zeichnungen

10

15

20

25

30

35

40

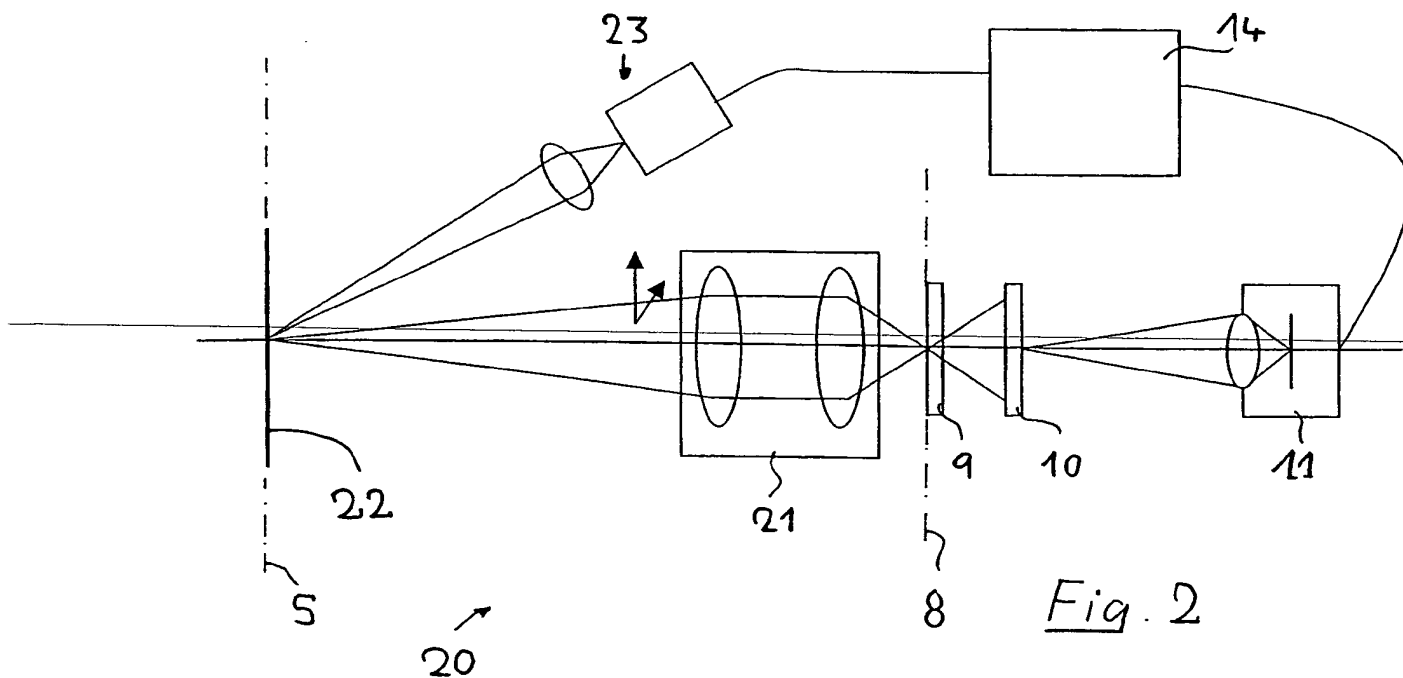
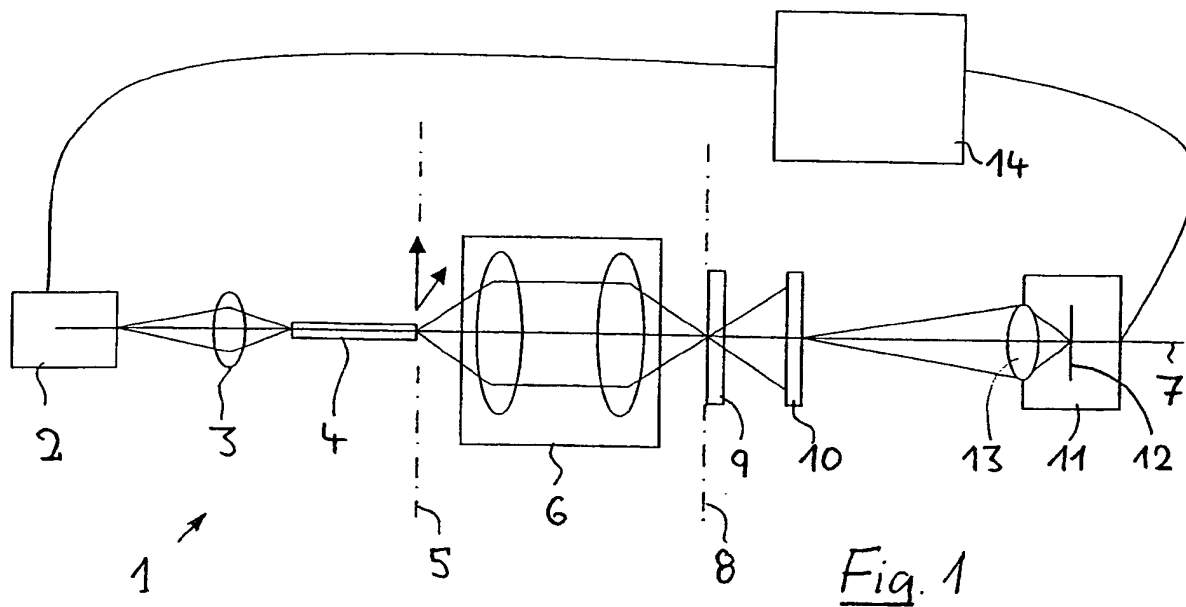
45

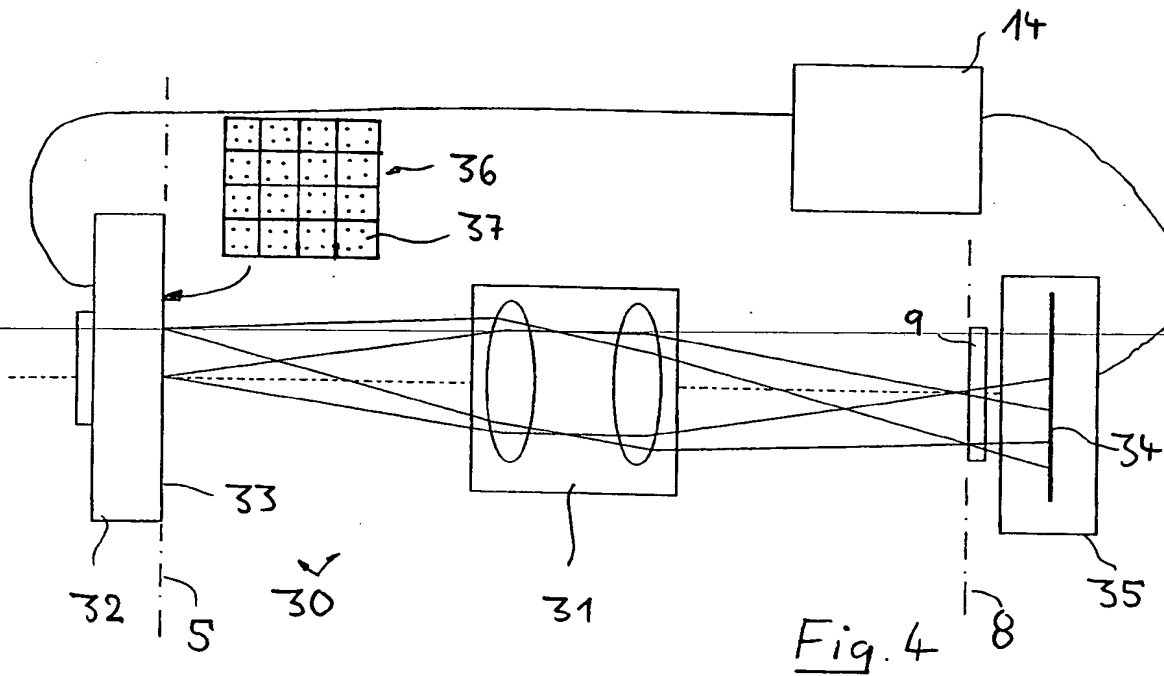
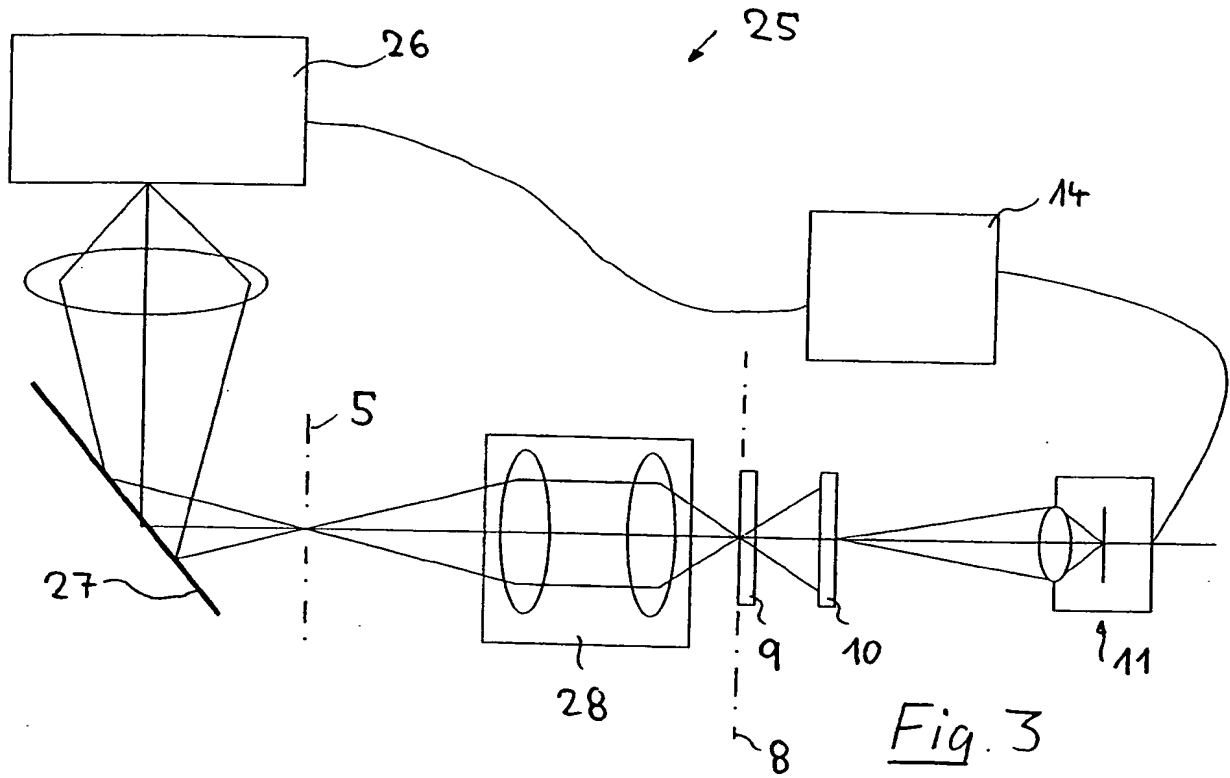
50

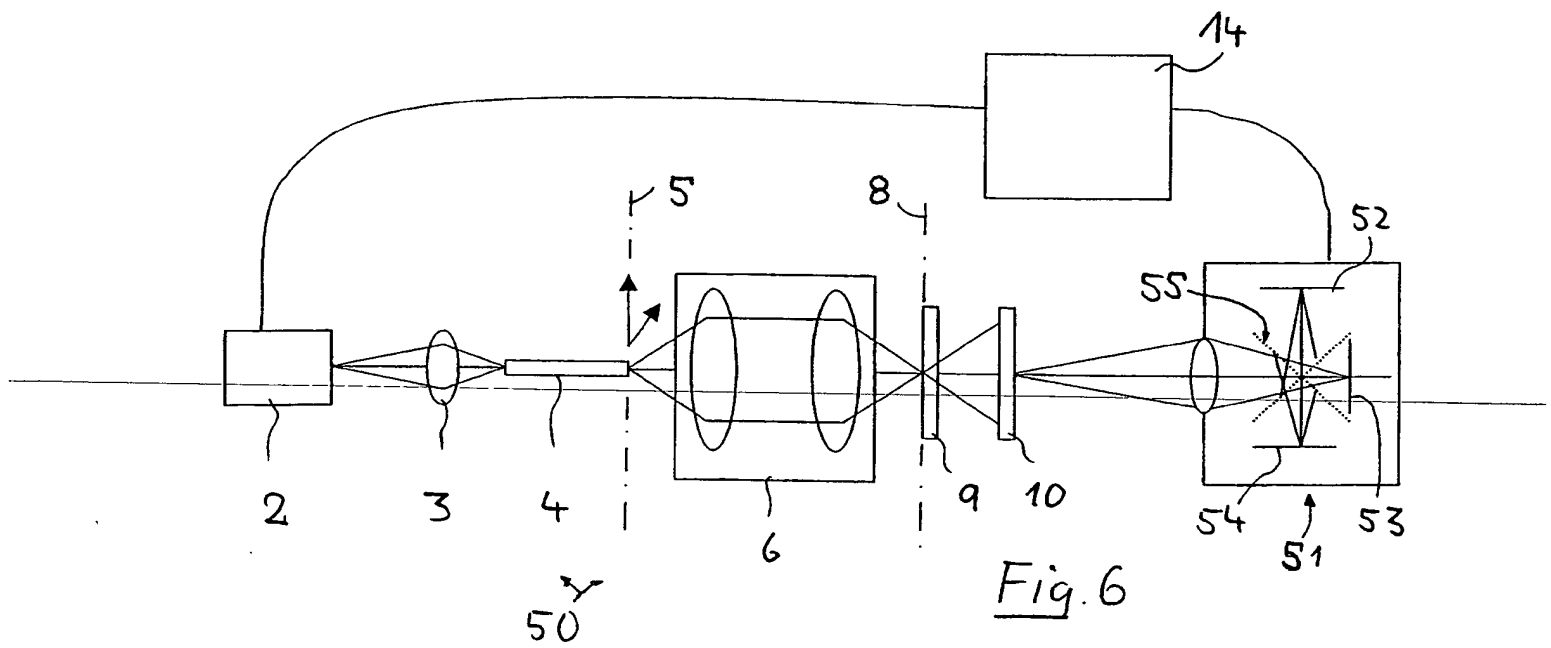
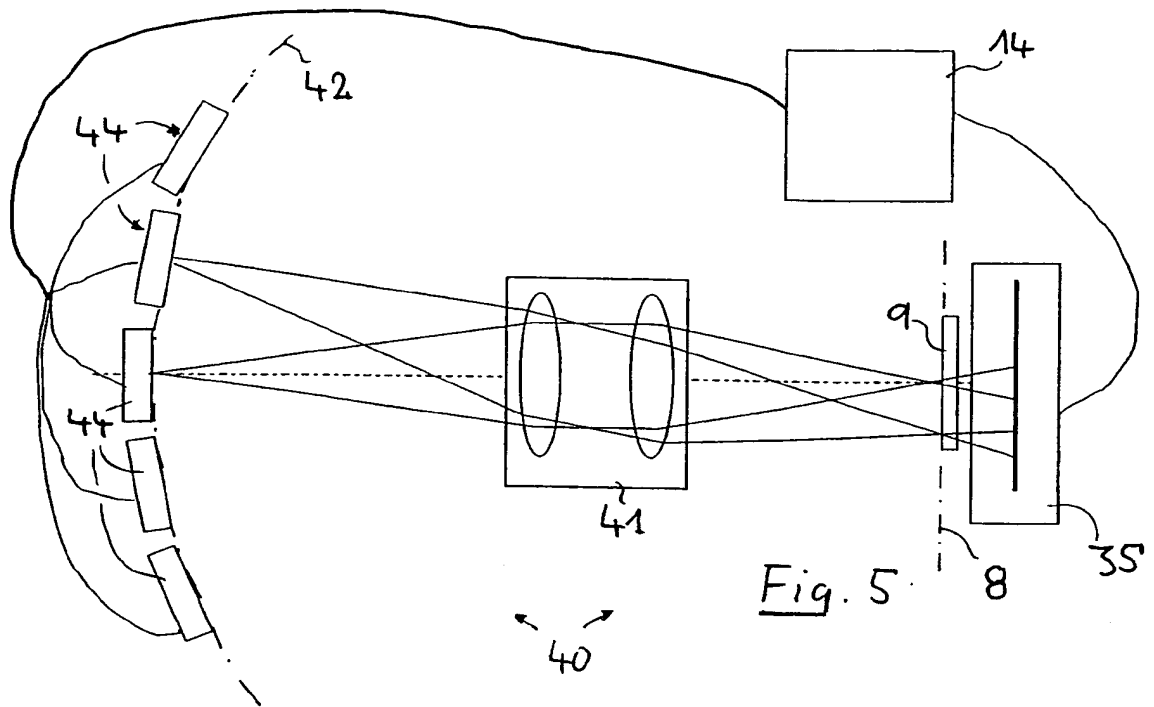
55

60

65







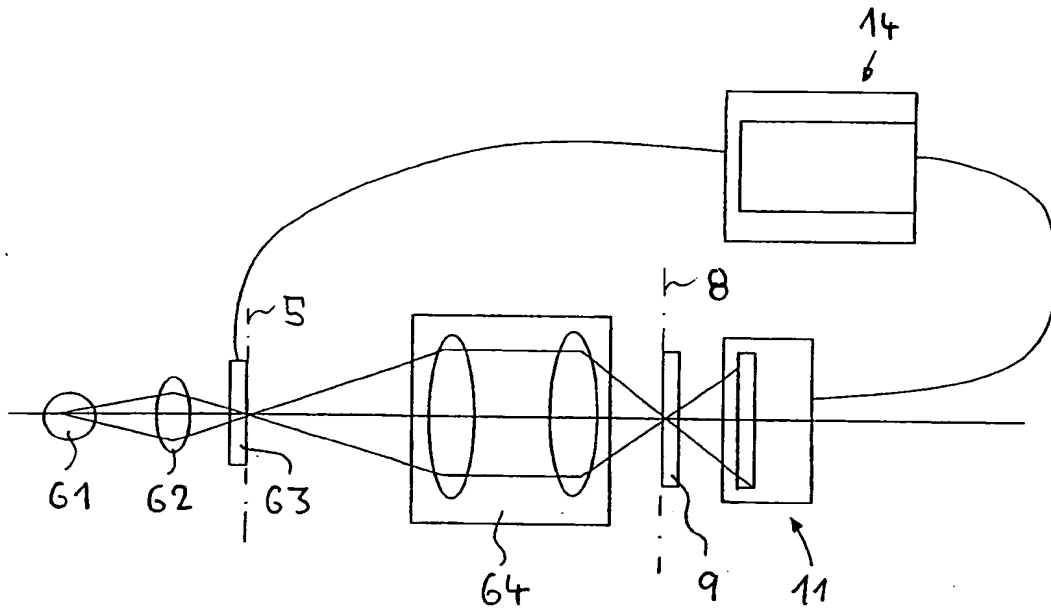


Fig. 7

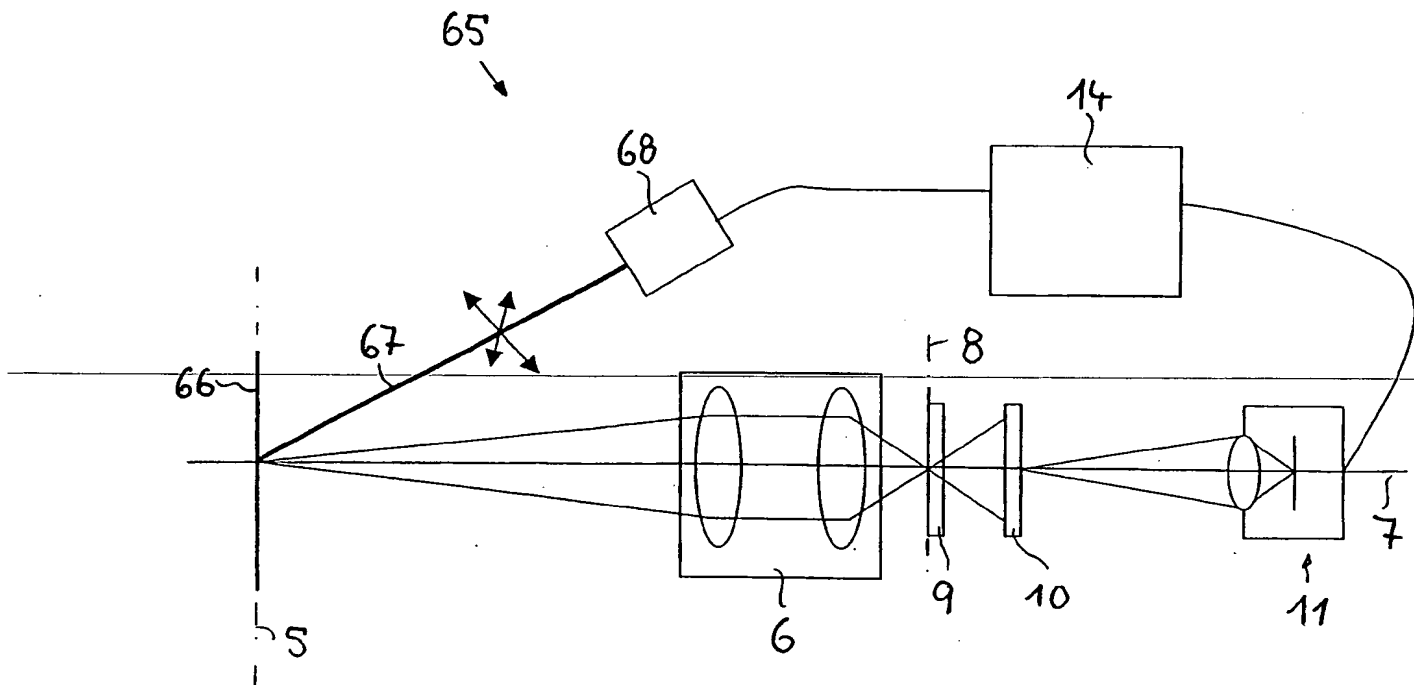
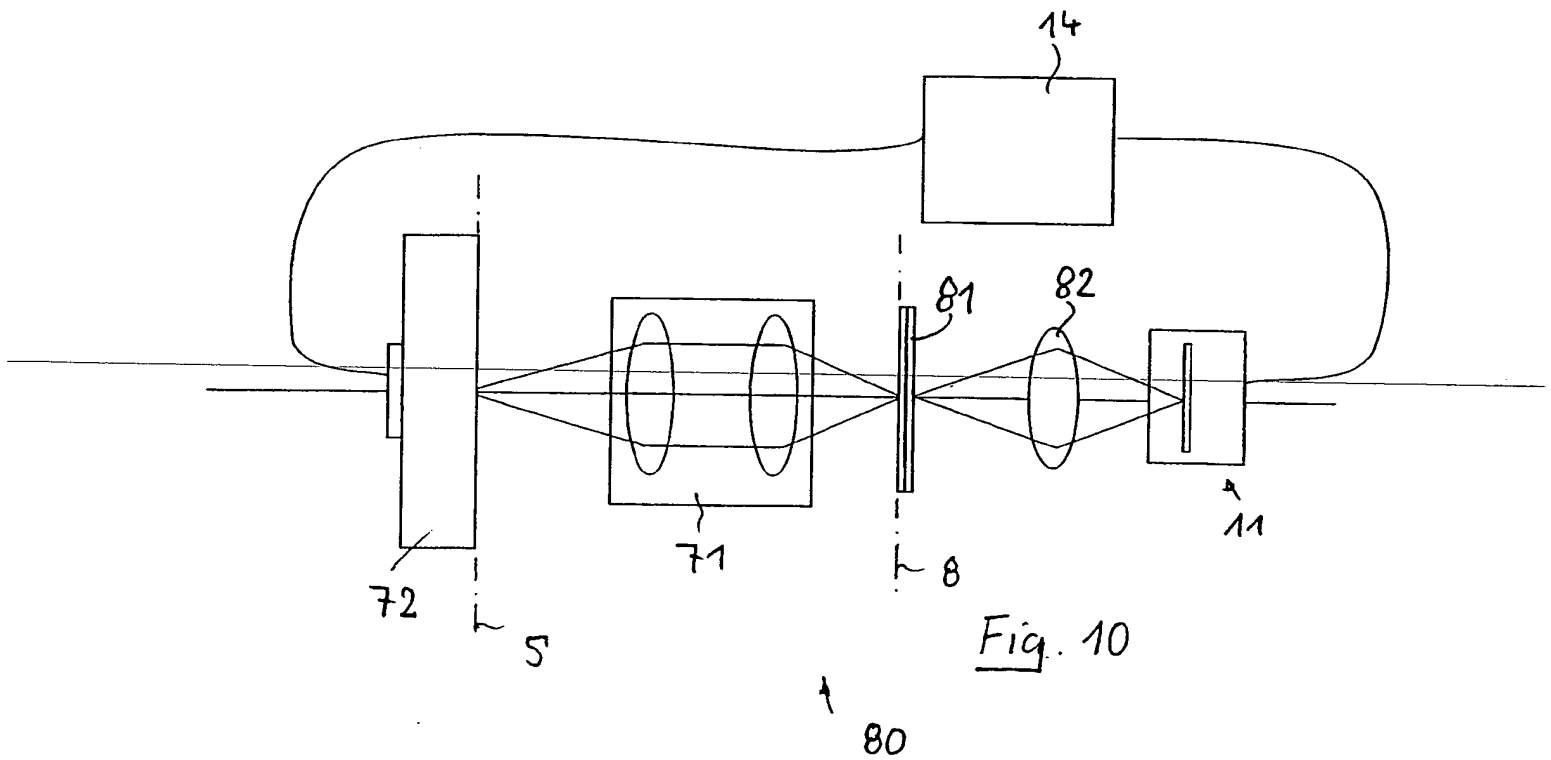
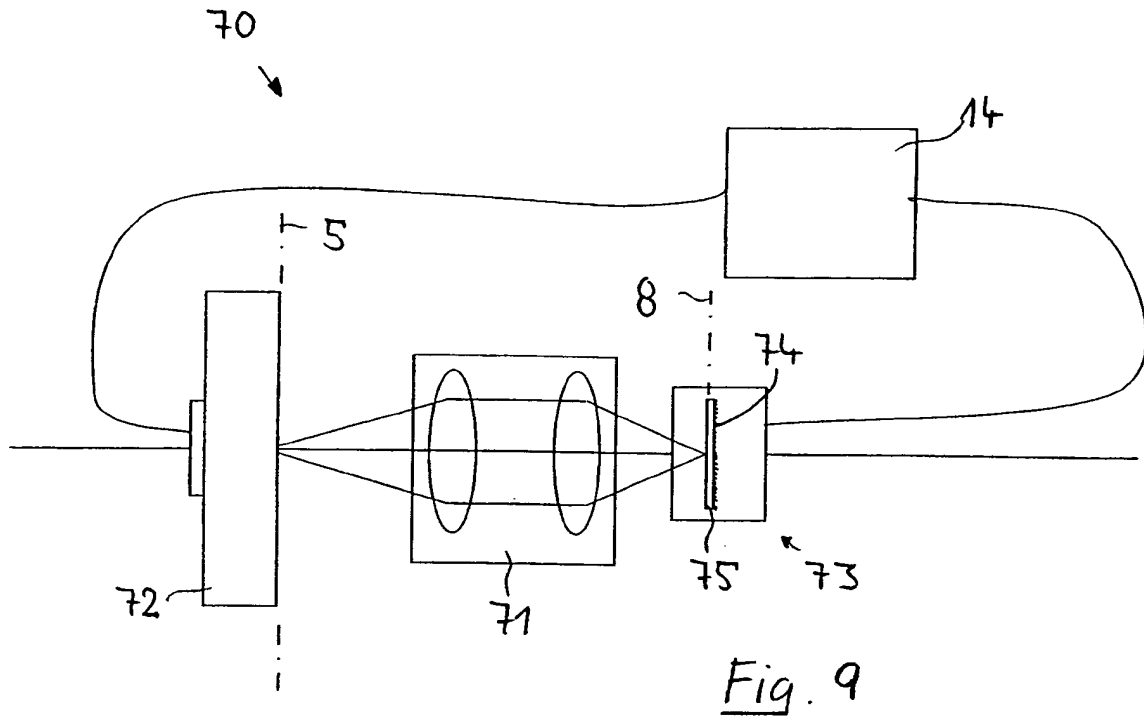
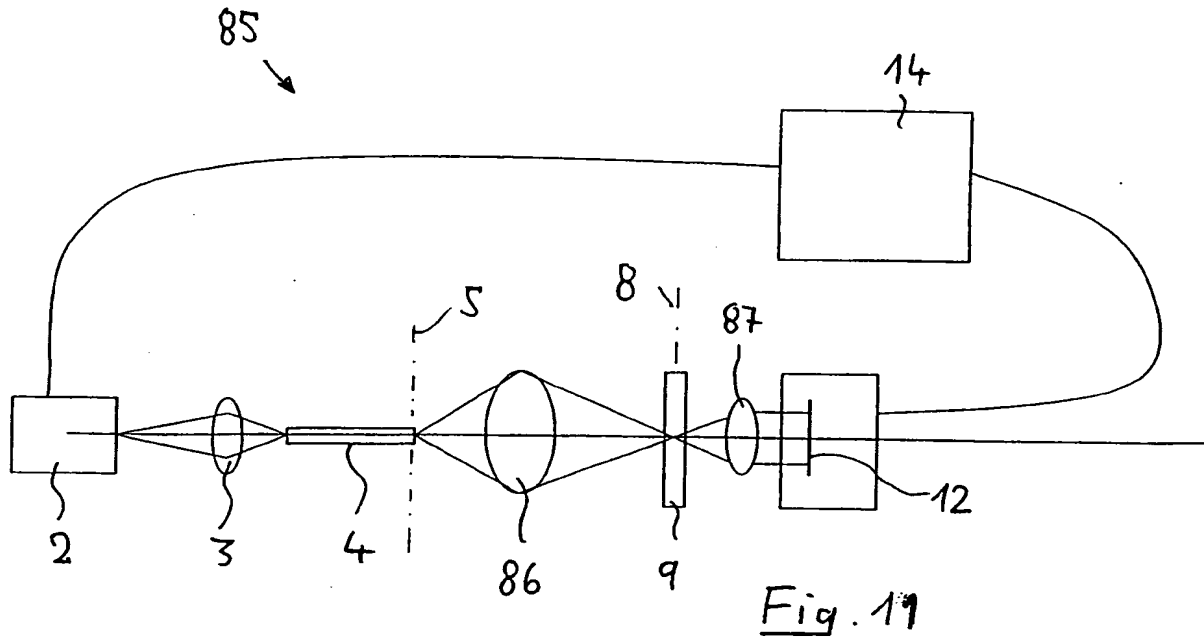


Fig. 8





88

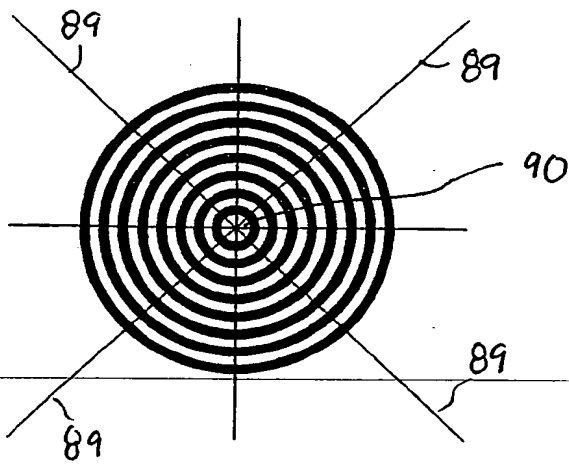


Fig. 12

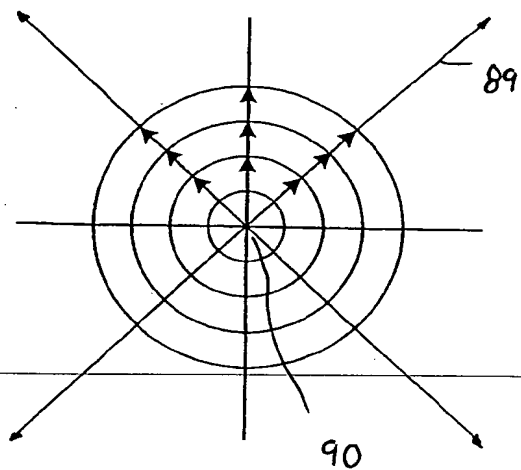


Fig. 13

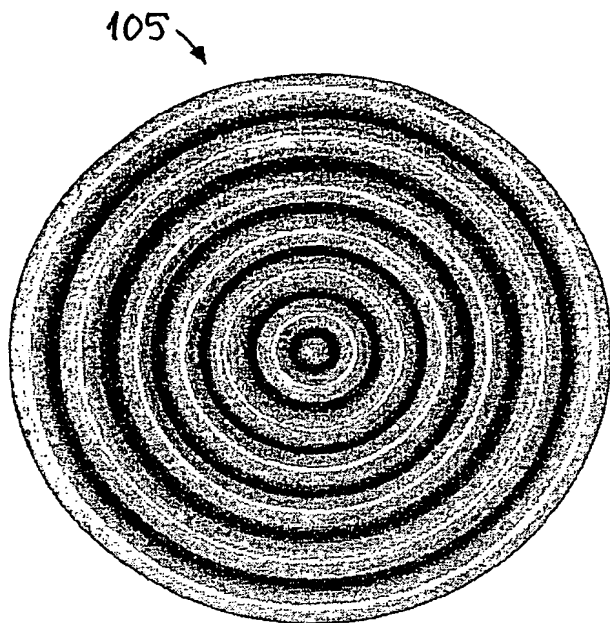


Fig. 17

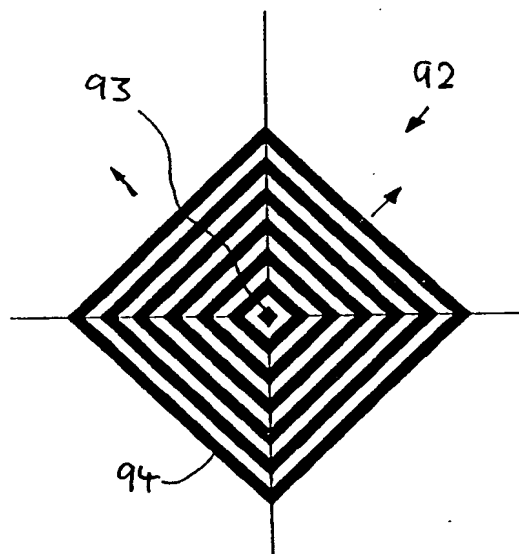


Fig. 14

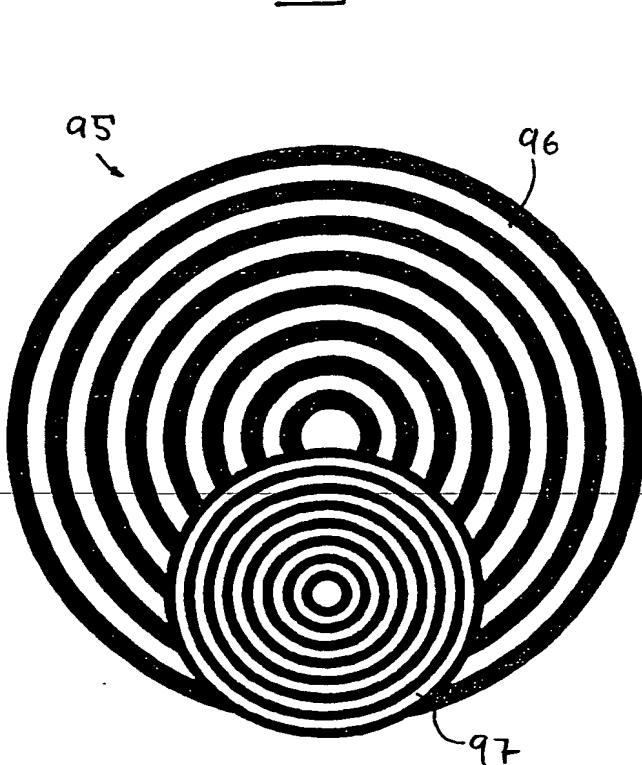


Fig. 15

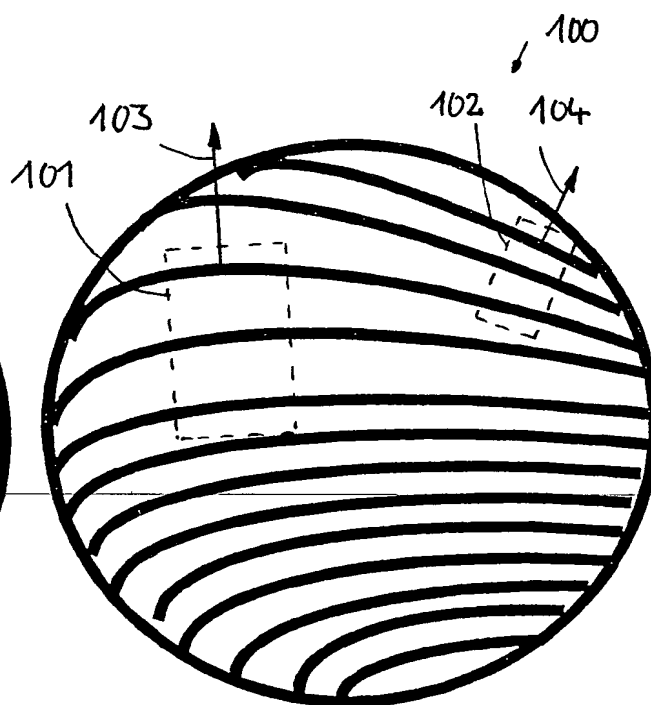


Fig. 16

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.

THIS PAGE BLANK (USPTO)